

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Struktur Beton Bertulang

Beton merupakan bahan yang paling banyak dipakai pada pembangunan dalam bidang teknik sipil, baik pada bangunan gedung, jembatan, bendung, maupun konstruksi yang lain. Kualitas beton sangat ditentukan oleh kualitas bahan susunnya. Oleh karena itu agar diperoleh beton yang baik, maka harus dipilih bahan susun yang berkualitas baik. Bahan susun yang baik ini mempunyai persyaratan-persyaratan tertentu yang harus dipenuhi (Asroni, 2010).

Berdasarkan SNI 2847:2019, beton merupakan material campuran komposit semen, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), dan air dengan atau tanpa campuran tambahan lainnya. Material beton ini dikenal kuat menahan gaya tarik yang terjadi, namun upaya untuk mengurangi kelemahan beton tersebut diperlukan tulangan. Menurut SNI 2847:2019, beton bertulang adalah beton struktural yang ditanam tulangan dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang di syaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan kedua elemen tersebut dapat memikul gaya lentur maupun lateral.

Pada proses perencanaan struktur bangunan khususnya gedung bertingkat diperlukan sebuah pedoman untuk mengetahui batasan dan syarat yang diperlukan pada kondisi kekuatan suatu elemen struktur. Aturan analisis ini bertujuan untuk memperkirakan gaya dalam dan deformasi dari sistem struktur dan memastikan persyaratan sudah terpenuhi, kemampuan layan (*serviceability*). Dalam hal ini, penggunaan komputer dalam rekayasa struktur (*structural engineering*) telah menjadikan bahan utama pengembangan untuk simulasi struktur yang rumit dapat dilakukan (Hasibuan, 2023).

2.1.1 Karakteristik Beton

Kekuatan beton akan meningkat secara cepat hingga usia 28 hari, tetapi setelah itu peningkatan kekuatan tekan beton menjadi lambat. Oleh karena itu, kuat tekan beton umumnya dijadikan sebagai acuan untuk menentukan kualitas suatu material beton (Ramdani et al., 2024). Dalam penentuan nilai mutu beton

disesuaikan berdasarkan SNI 2847:2019 pada Tabel 19.2.1.1 dengan nilai minimum mutu beton adalah $f'c = 21$ MPa. Sedangkan, nilai mutu maksimal tidak ditentukan.

2.1.1.1 Kuat Tekan Beton (*Compressive Strength*)

Tegangan dan regangan mempunyai hubungan deformasi pada tegangan maksimum dengan regangan saat hancur. Rumus kuat tekan beton uji silinder dapat dilihat sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Keterangan:

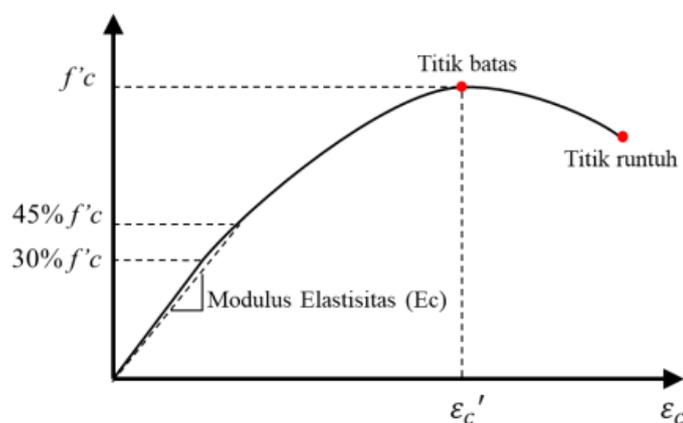
σ = Kuat tekan beton dengan benda uji silinder (MPa atau N/mm²)

P = Gaya tekanan aksial (N)

A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

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 (Hasibuan, 2023). Grafik hubungan antara tegangan dan regangan tekan pada beton dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Kurva tersebut menggambarkan perilaku kapasitas kekuatan material khususnya beton di bawah beban tekan. Grafik kurva ini dibutuhkan untuk merancang struktur agar tidak terjadi keruntuhan.



Gambar 2.1 Hubungan antara Tegangan dan Regangan Tekan Beton

2.1.1.2 Kuat Tarik Beton (*Tensile Strength*)

Kekuatan tarik biasanya ditentukan dengan menggunakan percobaan pembebanan silinder benda uji sama dengan kekuatan tekan yaitu percobaan diletakkan pada sisi di atas mesin uji dan beban P diletakkan sepanjang benda uji (Fazadina, 2016). Kekuatan tarik di dalam lentur sering juga dihitung dalam pendekatan berdasarkan hasil kuat tekan, f'_c untuk beton berbobot normal dengan rumus sebagai berikut (Dolan & Nilson, 2016):

$$f'_t = 0,5\sqrt{f'_c} \text{ sampai } f'_t = 0,6\sqrt{f'_c} \quad (2.2)$$

2.1.1.3 Kuat Geser Beton

Menurut SNI 2847-2002 kuat geser beton V_c untuk konstruksi rusuk boleh diambil 10% lebih besar daripada ketentuan yang diberikan. Kuat geser boleh dinaikkan dengan memberi tulangan geser atau dengan memperlebar ujung komponen rusuk. Kekuatan geser lebih sulit diperoleh dibandingkan dengan percobaan kekuatan sebelumnya karena tertutupnya geser dari tegangan-tegangan lainnya yang sulit.

2.1.1.4 Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas beton (E_c) merupakan tangen dari sudut α tersebut. Menurut Pasal 19.2.2 SNI 2847:2019 modulus elastisitas dapat ditentukan berdasarkan berat beton normal W_c dan kuat tekan beton f'_c , dengan rumus:

$$E_c = (W_c)^{1,5} \times 0,043 \times \sqrt{f'_c} \quad (2.3)$$

Dengan,

$$W_c = 1500 \sim 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (2.4)$$

Untuk beton normal, nilai F_c boleh diambil berikut:

$$F_c = 4700 \times \sqrt{f'_c} \quad (2.5)$$

Parameter lainnya yang bersangkutan dengan analisis perancangan tidak berpengaruh dan sulit diperkirakan, karena parameter yang sedikit dan kondisi yang

bergantung terhadap beban lentur sebagai faktor yang dilihat lamanya waktu proses pembeban.

2.1.1.5 *Simplified Concrete Damaged Palsticity (CDP)*

Menurut Nilai variabel pengerasan dan pelunakan masing-masing digunakan untuk penentuan tren retak dan penghancuran. Nilai tersebut bertanggung jawab atas hilangnya kekakuan elastis dan pengembangan permukaan luluh. Keadaan kerusakan dalam kompresi dan tegangan dicirikan secara independen oleh dua variabel pengerasan. Untuk mencari tegangan tidak elastis perilaku tekan beton dapat diketahui melalui persamaan sebagai berikut (Hafezolghorani et al., 2017):

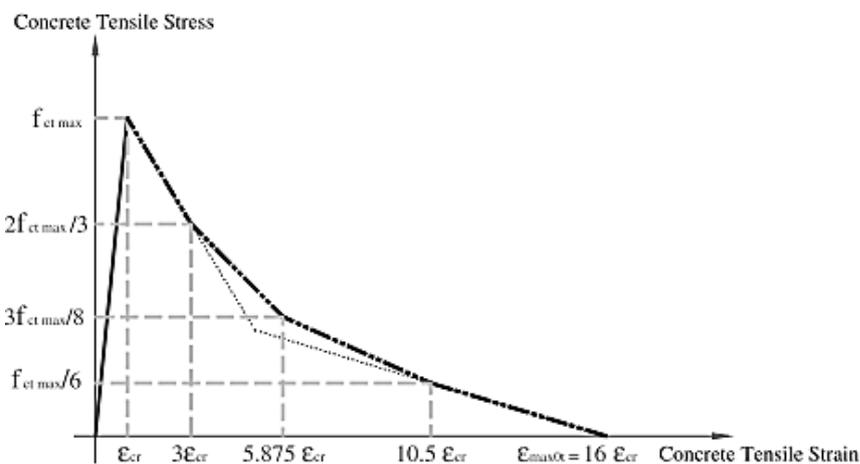
$$f'_c = f'_c \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

Atau jika disederhanakan menjadi

$$\left(-\frac{1}{0,002^2} \right) \epsilon_c^2 + \left(\frac{2}{0,002} \right) \epsilon_c + \left(-\frac{f'_c}{f'_c} \right) = 0 \quad (2.7)$$

Dalam hal ini persamaan menjadi $Ax^2 + Bx + C = 0$, dengan nilai ϵ_c adalah tegangan. Sedangkan untuk mencari parameter kerusakannya menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$d_c = 1 - \frac{f'_c}{f'_c} \quad (2.8)$$

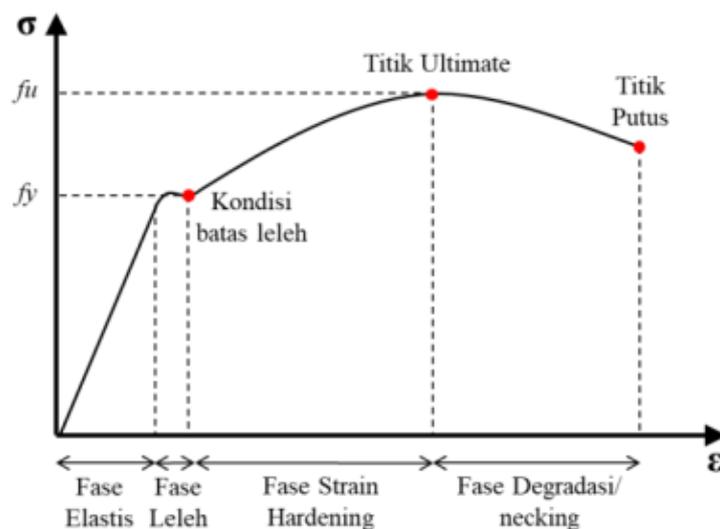


Gambar 2.2 Kurva Tegangan yang Dimodifikasi (Allam et al., 2013)

Perilaku kuat tarik beton ditentukan berdasarkan nilai yang umum terjadi sesuai pengujian dengan nilai yang dapat dilihat pada Gambar 2.2 .

2.1.2 Baja Tulangan (*Rebar*)

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 20.2.2.2 nilai modulus elastisitas baja dapat diambil 200.000 MPa, dengan kurva tegangan regangan dapat dilihat pada Gambar 2.3. Pada perencanaan struktur setelah beban gempa dimasukkan, analisis struktur akan mengetahui simpangan yang mungkin terjadi pada struktur dengan jumlah tulangan saat ini (Hendijaya, 2019). Maka dari itu parameter baja tulangan ini penting diketahui agar tidak terjadi suatu hal yang tidak diinginkan. Kegagalan pada kolom pendek, biasanya terjadi karena hancurnya material beton atau baja tulangan. Tetapi kegagalan pada kolom panjang, biasanya terjadi karena tertekuknya batang sehingga patah (Limbongan et al., 2016).



Gambar 2.3 Grafik Hubungan Tegangan Regangan Baja

Baja tulangan beton umumnya terdiri dari batang, kawat dan jaringan kawat baja las yang secara keseluruhan disusun dan dirakit sesuai dengan standar yang berlaku. Di pasaran baja tulangan yang tersedia ada 2 jenis, yaitu baja tulangan polos (BJTP) dan baja tulangan ulir (BJTS). Tulangan polos digunakan untuk tulangan sengkang atau geser dan mempunyai tegangan leleh (f_y) minimal 280 MPa dengan ukuran diameter beragam. Sifat mekanis pada baja tulangan ditunjukkan pada Tabel 2.1 yaitu sebagai berikut:

Tabel 2.1 Sifat Mekanis Baja Tulangan Menurut SNI 2052-2017

Simbol Mutu Baja	Kuat Leleh (fy) (MPa)	Kuat Tarik (fu) (MPa)
BJTP-280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350
BJTS-280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350
BJTS-420A	Min. 420 Maks. 545	Min. 525
BJTS-420B	Min. 420 Maks. 545	Min. 525
BJTS-520	Min. 520 Maks. 645	Min. 650
BJTS-550	Min. 550 Maks. 675	Min. 687,5
BJTS-700	Min. 700 Maks. 825	Min. 805

2.2 Sistem Struktur Tahan Gempa

Suatu elemen struktur direncanakan mampu menahan beban gravitasi seperti beban mati dan beban hidup. Namun, elemen struktur juga difungsikan untuk memikul beban lateral dan kombinasi beban gravitasi. Umumnya sistem yang digunakan pada struktur tahan beban lateral seperti gempa adalah struktur rangka, struktur dinding, dan struktur ganda.

2.2.1 Sistem Struktur Rangka (*Frame System*)

Sistem struktur rangka berdasarkan SNI 2847:2019 Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM), yaitu komponen rangka balok, pelat, kolom, dan *joint* yang menahan gaya melalui lentur, geser, dan gaya aksial. Pada sistem ini terdapat pembagian lagi menjadi 3 sistem, yaitu :

1. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB), yaitu elemen balok kolom atau rangka pelat kolom yang dicor di tempat atau pracetak dan memenuhi persyaratan pada SNI 2847:2019 Pasal 18.3. Pasal ini hanya berlaku untuk rangka momen biasa yang dikenakan Kategori Desain Seismik (KDS) B.
2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM), yaitu balok kolom atau rangka kolom dan pelat dua arah tanpa balok yang dicor di tempat dan memenuhi persyaratan pada SNI 2847:2019 Pasal 18.4. Pasal ini hanya berlaku untuk rangka momen menengah yang dikenakan KDS C.
3. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), yaitu rangka balok kolom yang dicor di tempat dan memenuhi persyaratan pada SNI 2847:2019 Pasal 18.2.3 – Pasal 18.2.8 dan Pasal 18.6 – Pasal 18.8. Bagi balok kolom pracetak memenuhi Pasal 18.2.3 – Pasal 18.2.8 dan Pasal 18.9. Pasal ini hanya berlaku untuk rangka momen menengah yang dikenakan KDS D, E atau F.

2.2.2 Sistem Struktur Dinding (*Wall System*)

Sistem struktur dinding merupakan salah satu sistem dalam konstruksi bangunan yang berperan sebagai elemen vertikal penahan beban lateral dan gravitasi. Artinya kolom dan balok tidak terpengaruh beban gempa, selain itu dinding dipasang sebagai material beton bertulang yang terhubung dengan elemen kolom dan balok. Berdasarkan SNI 2847:2019 terdapat Sistem Dinding Struktural Khusus (SDSK), yang digunakan pada struktur dengan KDS D, E, atau F. Sistem ini harus memenuhi Pasal 18.10. Selain SDSK, terdapat juga dinding struktural umum untuk struktur dengan KDS A, B, atau C. Secara prinsip desain, tidak terdapat perhitungan yang berbeda dari struktural khusus. Namun yang membedakan yaitu pada struktural umum tidak mewajibkan batasan elemen.

2.2.3 Sistem Struktur Ganda (*Dual System*)

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 7.2.5.8, sistem ini gabungan sistem rangka dengan sistem dinding, yang mana terdapat pembagian peran dalam memikul beban lateral antara struktur rangka dan struktur dinding. Struktur rangka sekurang-kurangnya harus mampu menahan 25% dalam memikul beban gempa dan struktur dinding sekurang-kurangnya harus mampu menahan 75%. Hal ini

dikarenakan upaya memberikan tahanan gempa redundansi dari struktur, supaya struktur tidak runtuh.

Simpangan pada sistem ganda diperoleh dengan cara menggabungkan perilaku elemen rangkai dan dinding beton bertulang. Sehingga geser akibat gaya lateral dipikul oleh rangka atas struktur gedung dan *shear wall* memikul bagian bawah struktur gedung.

2.3 Pembebanan

Sehubungan dengan sifat elastisitas dari bahan-bahan struktur, setiap sistem atau elemen struktur akan berdeformasi jika dibebani, dan akan kembali ke bentuknya yang semula jika beban yang bekerja dihilangkan. Oleh karena itu struktur mempunyai kecenderungan untuk bergoyang ke samping (*slideway*), atau melentur kebawah (*deflection*) jika dibebani (Saputra & Firmanto, 2017).

Perhitungan pembebanan dapat dilakukan berbeda-beda sesuai dengan kondisi lapangan. Beban yang umum dipakai untuk analisis yaitu beban mati, beban hidup, beban gempa, dan lainnya. Perhitungan dapat dilakukan dengan rumus yang sudah disyaratkan sebagai kombinasi pembebanan. Pengertian Pembebanan secara umum menurut SNI 2847:2019 adalah sebagai berikut:

1. Beban mati adalah berat semua bagian dari suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala beban tambahan, *finishing*, mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung tersebut.
2. Beban hidup adalah semua beban yang terjadi akibat pemakaian dan penghunian suatu Gedung, termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah dan/atau beban akibat air hujan pada atap.
3. Beban gempa adalah fenomena yang diakibatkan oleh benturan atau gesekan lempeng tektonik (*plate tectonic*) bumi yang terjadi di daerah patahan (*fault zone*) (Saputra & Firmanto, 2017).

2.3.1 Beban Mati (DL)

Menurut SNI 1727, 2020 beban mati adalah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, *finishing*, *klading* gedung dan komponen arsitektural dan

struktural lainnya serta peralatan layan terpasang lain termasuk berat derek dan sistem pengangkut material. Dalam hal ini berat mati sendiri struktur yaitu kolom dan balok dengan berat sendiri dianggap beban gravitasi.

2.3.2 Beban Mati Tambahan (SDL)

Beban mati tambahan merupakan beban ada pada struktur utama bangunan selain beban mati sendiri, beban hidup, dan beban lingkungan. Umumnya beban yang digunakan pada gedung perkantoran didistribusikan di pelat beton setiap lantai dengan ketentuan yang berbeda-beda.

2.3.3 Beban Hidup (LL)

Menurut SNI 1727:2020 beban hidup adalah beban pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati. Beban hidup pada perkantoran dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Beban Hidup Terdistribusi

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Terpusat (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)				
Sistem lantai akses				
Ruang kantor	2,4	Ya	Ya	8,9
Ruang komputer	4,79	Ya	Ya	8,9
Gudang persenjataan dan ruang latihan	7,18	Tidak	Tidak	
Ruang pertemuan				
Kursi tetap (terikat di lantai)	2,87	Tidak	Tidak	
Lobi	4,79	Tidak	Tidak	
Kursi dapat dipindahkan	4,79	Tidak	Tidak	
Panggung pertemuan	4,79	Tidak	Tidak	
Lantai podium	7,18	Tidak	Tidak	
	4,79	Tidak	Tidak	

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
Tribun penonton stadion dan arena dengan kursi tetap (terikat dilantai)	2,87	Tidak	Tidak	
Ruang pertemuan lainnya	4,79	Tidak	Tidak	
Balkon dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi (4,79)	Ya	Ya	
Jalur untuk akses pemeliharaan	1,92	Ya	Ya	1,33
Koridor Lantai pertama Lantai lain	4,79 Sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutka n lain	Ya	Ya	
Ruang makan dan restoran	4,79	Tidak	Tidak	
Hunian (lihat rumah tinggal)				
Desain mesin elevator (pada area 50 mm x 50 mm)	-	-	-	1,33
Konstruksi pelat lantai <i>finishing</i> ringan (pada area 25 mm x 25 mm)	-	-	-	0,89
Jalur penyelamatan saat kebakaran Hunian satu keluarga saja	4,79	Ya	Ya	

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
Tangga permanen		-	-	4.5.4
Garasi/parkir				
Mobil penumpang saja	1,92	Tidak	Tidak	4.10.1
Truk dan bus	4.10.2	-	-	4.10.2
Pegangan tangga dan pagar pengaman				
Batang pegangan	4.5.1	-	-	4.5.1 4.5.2
Helipad				
Helikopter dengan berat lepas landas sebesar 3.000 lb (13,35 kN) atau kurang	1,92	Tidak	-	4.11.2
Helikopter dengan berat lepas landas lebih 3.000 lb (13,35 kN)	2,87	Tidak	-	4.11.2
Rumah Sakit				
Ruang operasi, laboratorium	2,87	Ya	Ya	4,45
Ruang pasien	1,92	Ya	Ya	4,45
Koridor diatas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	4,45
Hotel (Seperti Rumah Tinggal)				
Perpustakaan				
Ruang baca	2,87	Ya	Ya	4,45
Ruang penyimpanan	7,18	Tidak	Ya	4,45
Koridor diatas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	4,45
Pabrik				
Ringan	6,00	Tidak	Ya	8,9
Berat	11,97	Tidak	Ya	13,35
Gedung perkantoran				
Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian				

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Terpusat (kN)
Lobi dan koridor lantai pertama	4,79	Ya	Ya	8,90
Kantor	2,40	Ya	Ya	8,90
Koridor diatas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	8,90
Lembaga hukum				
Blok sel	1,92	Ya	Ya	
Koridor	4,79	Ya	Ya	
Tempat rekreasi				
Tempat bowling, billard, dan penggunaan sejenis	3,59	Tidak	Tidak	
Ruang dansa dan ballroom	4,79	Tidak	Tidak	
Gimnasium	4,79	Tidak	Tidak	
Rumah tinggal				
Hunian satu dan dua keluarga				
Loteng yang tidak dapat dihuni tanpa gudang	0,48	Ya	Ya	4.12.1
Loteng yang tidak dapat dihuni dengan gudang	0,96	Ya	Ya	4.12.1
Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur	1,44	Ya	Ya	
Semua ruang kecuali tangga	1,92	Ya	Ya	
Semua hunian rumah tinggal lainnya				
Ruang pribadi dan koridor	1,92	Tidak	Tidak	
Ruang publik	4,79	Ya	Ya	
Koridor ruang publik	4,79	Ya	Ya	
Atap				
Atap datar, terhubung, dan lengkung	0,96	Ya	-	
Atap yang digunakan penghuni	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya	-	

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
Atap untuk tempat berkumpul	4,70	Ya	-	
Atap vegetatif dan atap lansekap				
Atap bukan untuk hunian	0,96	Ya	-	
Atap untuk tempat berkumpul	4,79	Ya	-	
Atap untuk penggunaan lainnya	Sama dengan Pengguna an yang dilayani	Ya	-	
<i>Awning</i> dan kanopi				
Atap konstruksi <i>fabric</i> yang didukung oleh struktur rangka kaku ringan	0,24	Tidak	-	
Rangka penumpu layar penutup	0,24	Tidak	-	
	Berdasar- kan area tributari dari atap yang didukung oleh kompone n struktur rangka			
Semua konstruksi lainnya	0,96	Ya	-	
Komponen struktur atap utama, yang terhubung langsung dengan pekerjaan lantai tempat bekerja				
Titik panel tunggal dari kord bawah rangka batang atap atau suatu titik sepanjang komponen struktur utama pendukung atap diatas pabrik, gudang penyimpanan dan pekerjanya, dan garasi bengkel		-	-	
Semua komponen struktur atap utama lainnya		-	-	
Semua permukaan atap dengan beban pekerja pemeliharaan		-	-	

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
Sekolah				
Ruang kelas	1,92	Ya	Ya	4,45
Koridor di atas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	4,45
Koridor lantai pertama	4,79	Ya	Ya	4,45
Scuttles, rusuk untuk atap kaca dan langit-langit yang dapat diakses				0,89
Jalan di pinggir untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan lahan/jalan untuk truk-truk	11,97	Tidak	Ya	35,60
Tangga dan jalan keluar	4,79	Ya	Ya	1,33
Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga saja	1,92	Ya	Ya	1,33
Gudang diatas langit-langit	0,96	Ya	Ya	
Gudang penyimpanan dan pekerja (harus dirancang untuk beban lebih berat jika diperlukan)				
Ringan	6,00	Tidak	Ya	
Berat	11,97	Tidak	Ya	
Toko				
Eceran				
Lantai pertama	4,79	Ya	Ya	4,45
Lantai di atasnya	3,59	Ya	Ya	4,45
Grosir, di semua lantai	6,00	Tidak	Ya	4,45
Penghalang kendaraan				4.5.3
Susunan jalan dan panggung yang ditinggikan (selain jalan keluar)	2,87	Ya	Ya	
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	4,79	Tidak	Tidak	

2.3.4 Beban Gempa

Gempa rencana adalah gempa yang kemungkinan terlewati besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun. Penetapan besarnya gempa rencana didasarkan pada peta zonasi gempa dan kategori risiko struktur.

Parameter yang digunakan pada beban gempa struktur portal beton bertulang pada gedung perkantoran ini yaitu menggunakan beban respons spektrum yang mempertimbangkan karakteristik dinamis struktur.

2.3.4.1 Kategori Risiko Bangunan

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 4.1.2, kategori risiko bangunan tergantung pada jenis kegunaan bangunan tersebut, seperti yang ada pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kategori Risiko untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: <ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur 	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/rumah susun - Pusat perbelanjaan - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik 	II
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> - Bioskop 	III

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<ul style="list-style-type: none"> - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	
<p>Gedung dan non gedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah - Rumah sakit memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Pusat pembangkit energi dan fasilitas lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat 	IV

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
- Struktur tambahan (termasuk telekomunikasi, penyimpanan bahan bakar, pendingin, struktur stasiun listrik, air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat.	

2.3.4.2 Faktor Keutamaan Gempa

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 4.1.2 pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa (I_e). Faktor keutamaan gempa ini akan digunakan pada perhitungan faktor skala dengan nilai seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Nilai Faktor Keutamaan Gempa (I_e)

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa (I_e)
I atau II	1,00
III	1,25
IV	1,5

2.3.4.3 Klasifikasi Situs

Profil tanah di situs harus diklasifikasikan sesuai dengan Tabel 2.5, dengan lapisan profil tanah 30 m paling atas. Namun, apabila kondisi atau sifat tanah tidak memadai untuk penentuan kelas situs, maka kelas situs SE (tanah lunak) harus digunakan sesuai dengan syarat pada SNI 1726:2019 Pasal 6.2.

Tabel 2.5 Klasifikasi Situs

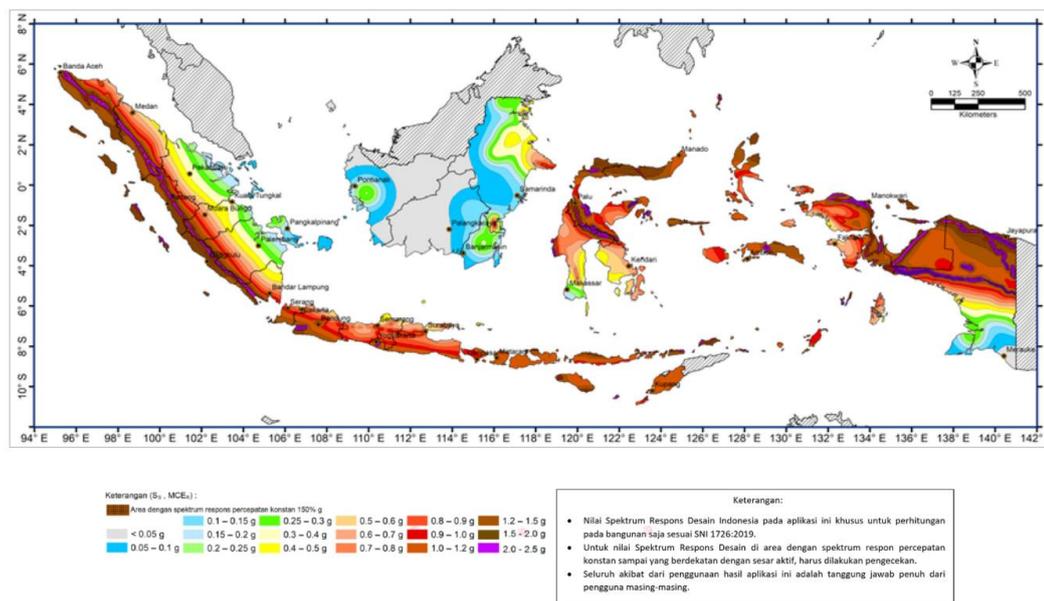
Kelas Situs	v_s (m/detik)	N atau N_{ch}	s_u (kPa)
SA (Batuan Keras)	>1500	N/A	N/A
SB (Batuan)	750 – 1500	N/A	N/A
SC (Tanah keras)	350 – 750	>50	>100

Kelas Situs	v_s (m/detik)	N atau N_{ch}	s_u (kPa)
SD (Tanah sedang)	175 – 350	15 – 50	50 - 100
SE (Tanah lunak) <50	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w > 40\%$, dan 3. Kuat geser niralir $s_u < 25$ kPa		
SF (Tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik situs)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: <ul style="list-style-type: none"> - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuefaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/ atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan Indeks Plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak / setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $s_u < 50$ kPa		

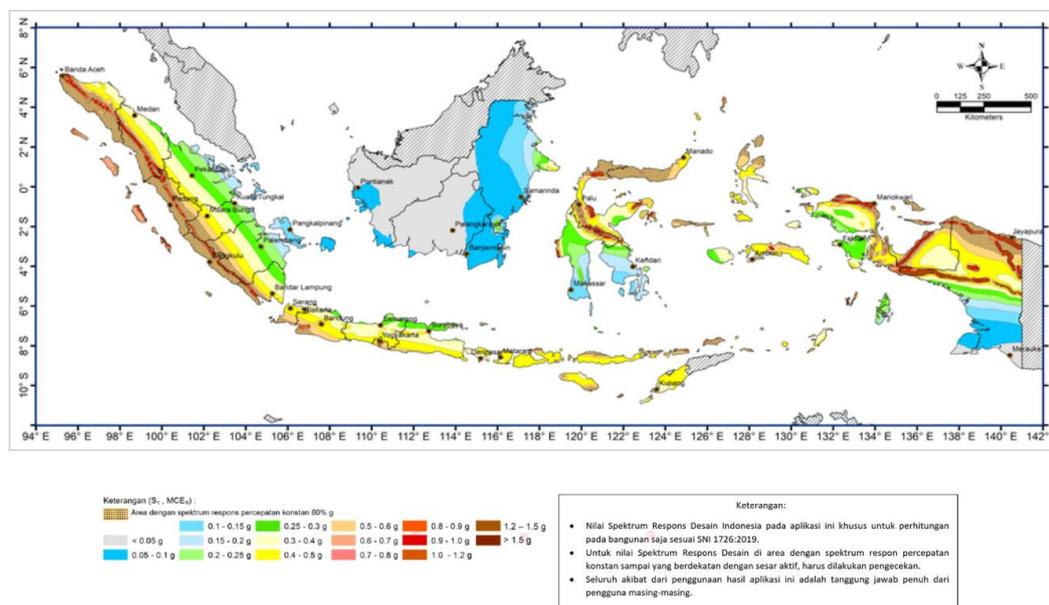
2.3.4.4 Wilayah Gempa Indonesia

. Indonesia termasuk dalam jalur cincin api Pasifik (*ring of fire*) atau rangkaian gunung aktif dunia. Karena itu, Indonesia menjadi salah satu negara yang rawan peristiwa gempa. Pada perencanaannya parameter percepatan gempa batuan dasar terdiri dari SS (percepatan batuan dasar pada periode pendek 0,2 detik) dan $S1$ (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik), yang ditetapkan masing-masing dari respons spektrum percepatan 0.2 dan 1 detik dalam peta gempa untuk periode

ulang 2500 tahun. Berdasarkan halaman resmi RSA Cipta Karya, peta yang dipercepat dapat dilihat pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Percepatan Batuan Dasar Pada Periode Pendek 0,2 Detik (SS)



Gambar 2.5 Percepatan Batuan Dasar Pada Periode Pendek 1 Detik (S1)

2.3.4.5 Faktor Koefisien Situs

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.2, penentuan respons spektrum percepatan gempa MCER di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi

faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, ditentukan dengan persamaan berikut

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \quad (2.9)$$

$$S_{M1} = F_v \cdot S_1 \quad (2.10)$$

Nilai F_a dan F_v berdasarkan halaman resmi Cipta Karya dapat dilihat pada Tabel 2.6 dan Tabel 2.7.

Tabel 2.6 Koefisien Situs, F_a

Kelas Situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCER) Terpetakan pada Periode Pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s > 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

Tabel 2.7 Koefisien Situs, F_v

Kelas Situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCER) Terpetakan pada Periode 1 detik, S_1					
	$S_s \leq 0,1$	$S_s = 0,2$	$S_s = 0,3$	$S_s = 0,4$	$S_s = 0,5$	$S_s > 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Kelas Situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE _R) Terpetakan pada Periode 1 detik, S ₁					
	SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS ^(a)					

(a) = situs yang dibutuhkan investigasi geoteknik spesifikasi & analisis spesifik.

2.3.4.6 Spektrum Respons Desain

Respons spektrum merupakan nilai yang menggambarkan respons maksimum dari sistem berderajat kebebasan tunggal (SDOF) pada berbagai frekuensi dan periode alami teredam akibat suatu goyangan tanah. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.3-6.4, Sebelum dapat membuat kurva respons spektrum desain, harus ditentukan terlebih dahulu parameter percepatannya untuk perioda pendek (S_{DS}) dan pada perioda 1 detik (S_{DI}) menggunakan persamaan (2.11) dan (2.12).

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.11)$$

$$S_{DI} = \frac{2}{3} S_{MI} \quad (2.12)$$

Apabila spektrum respons desain digunakan data spesifik gerak tanah, maka kurva spektrum respons desain harus dibuat dengan mengacu ketentuan berikut:

1. Setiap periode yang lebih kecil dari T_0 , maka S_a harus diambil dari persamaan (2.13).

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + \frac{0,6T}{T_0} \right) \quad (2.13)$$

2. Selanjutnya setiap periode $\geq T_0$ dan periode $\leq T_s$, spektrum respons percepatan desain, maka S_a sama dengan S_{DS} .
3. Untuk $T_L \geq$ periode $> T_s$, respons spektrum percepatan desain, S_a diambil berdasarkan persamaan (2.14).

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.14)$$

4. Untuk periode $> T_L$, respons spektrum percepatan desain, S_a diambil berdasarkan persamaan

$$S_a = \frac{S_{D1} \times T_L}{T^2} \quad (2.15)$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter respons spektrum percepatan desain pada periode pendek

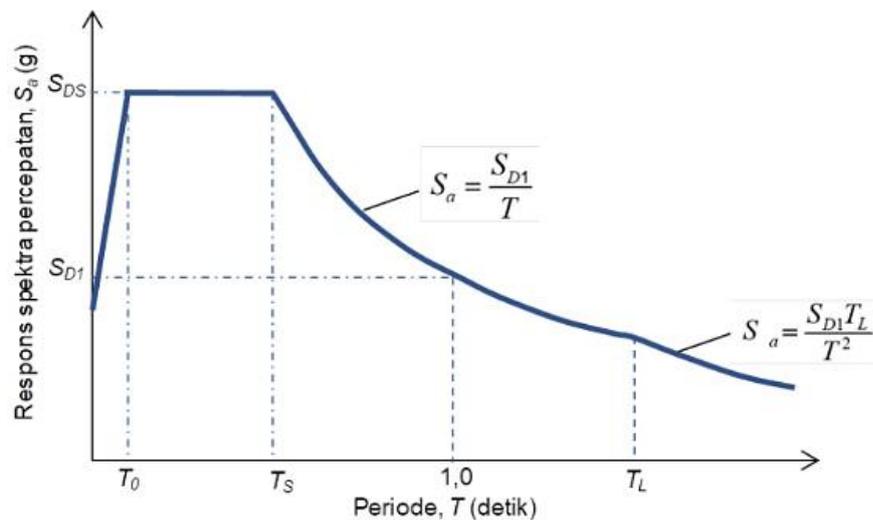
S_{D1} = parameter respons spektrum percepatan desain pada periode 1 detik

T = periode getar fundamental struktur

$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} ; T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$

T_L = periode panjang (6, 8, 12, 16, 20 detik)

Untuk bentuk rencana grafik berdasarkan spektrum respons desain dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Spektrum Respons Desain

2.3.4.7 Kategori Desain Seismik

Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 6.5, kategori desain seismik ditentukan dari kategori risiko bangunan dan tingkat gerakan tanah akibat gempa pada periode S_{DS} dan S_{D1} pada lokasi penelitian sesuai dengan Tabel 2.8 dan Tabel 2.9.

Tabel 2.8 Kategori Risiko Berdasarkan Nilai S_{DS}

Nilai S_{DS}	Kategori Risiko	
	I, II, atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

Tabel 2.9 Kategori Risiko Berdasarkan Nilai S_{D1}

Nilai S_{DS}	Kategori Risiko	
	I, II, atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Catatan: Lokasi dengan nilai $S_1 \geq 0,75$ g, maka KDS = E, untuk kategori risiko I,II,III dan KDS = F, untuk kategori risiko IV.

2.3.4.8 Parameter Sistem Penahan Gaya Seismik

Elemen-elemen sistem pemikul gaya seismik harus memenuhi persyaratan pendetailan sesuai SNI 1726:2019 Tabel 12 untuk sistem struktur yang dipilih ada pada poin C dengan parameternya dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Faktor R, C_d, dan Ω_o untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem Pemikul Gaya Seismik	R	Ω _o	C _d	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h _n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D	E	F
C. Sistem Rangka Pemikul Momen								
Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^k	TI ^k	TI ^k
Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI ^l	TI ^l	TI ^l
Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI

Sistem Pemikul Gaya Seismik	R	Ω_0	Cd	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D	E	F
Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus pembautan	3½	3°	3½	10	10	10	10	10

Keterangan: TB = Tidak dibatasi , TI = Tidak diizinkan

2.3.4.9 Perhitungan Gaya Lateral Ekuivalen

Pada perhitungannya, persamaan yang digunakan disesuaikan dengan SNI 1726:2019, meliputi:

1. Gaya Geser Dasar Seismik (V)

Gaya geser dasar seismik (V) secara umum, dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$V = C_s \times W \quad (2.16)$$

Keterangan:

C_s = koefisien respons seismik

W = berat seismik efektif

2. Koefisien Respons Seismik (C_s)

Kemudian, nilai Koefisien Respons Seismik (C_s) dihitung mengikuti persamaan berikut:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\frac{R}{I_e}} \quad (2.17)$$

Namun jika nilai C_s yang dihitung tidak perlu melebihi nilai C_s maksimum, maka persamaannya menjadi:

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \frac{R}{I_e}} \quad (2.18)$$

Untuk $T \geq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \frac{R}{I_e}} \quad (2.19)$$

Jika nilai C_s yang dihitung tidak kurang nilai C_s minimum, maka persamaannya menjadi:

$$C_s = 0,044 \times S_{DS} \times I_e \geq 0,01 \quad (2.20)$$

Dan untuk struktur yang berlokasi di daerah yang mana $S_1 \geq 0,6g$, maka C_s harus tidak kurang dari C_s minimum dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\frac{R}{I_e}} \quad (2.21)$$

Keterangan:

- S_{DS} = Parameter percepatan spektrum desain untuk perioda pendek
- S_{D1} = Parameter percepatan spektrum desain untuk perioda 1,0 detik
- S_1 = Parameter percepatan respons spektrum maksimum
- T = Periode fundamental struktur (detik)
- R = Koefisien modifikasi respons
- I_e = Faktor keutamaan gempa

3. Berat Seismik Efektif (W)

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.7.2 berat seismik efektif struktur, harus menyertakan seluruh beban mati dan minimum 25% beban hidup lantai.

4. Periode Fundamental (T)

Periode fundamental struktur (T) tidak boleh melebihi hasil perkalian koefisien untuk batasan atas pada periode (C_u) seperti Tabel 2.12 dan periode fundamental pendekatan (T_a) yang ditentukan sesuai persamaan (2.22). Apabila nilai T tidak tersedia, maka dapat menggunakan periode bangunan pendekatan (T_a).

a. Periode Fundamental pendekatan (T_a)

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.22)$$

Keterangan:

h_n = Ketinggian Struktur (m)

C_t dan x = Koefisien Tabel 2.11

Tabel 2.11 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:		
- Rangka Baja Pemikul Momen	0,0724	0,8
- Rangka Beton Pemikul Momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

b. Batas Atas Periode Fundamental ($C_u \times T_a$)

Batas atas periode fundamental dapat dihitung dengan mengalikan nilai C_u dengan nilai T_a , nilai koefisien C_u didapat berdasarkan nilai S_{D1} yang dilihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

c. Pemilihan Periode Fundamental

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 7.8.2, periode fundamental struktur tidak boleh melebihi nilai $T = C_u.T_a$ dan tidak boleh kurang dari periode fundamental pendekatan ($T_a = C_t(h_n)^x$). Kemudian jika periode fundamental hasil analisis struktur menggunakan komputer, $T_c > T = C_u.T_a$ pada suatu arah tertentu, maka periode struktur (T) harus diambil sebesar ($T = C_u.T_a$).

5. Distribusi Beban Gempa Perlantai

Beban gempa perlantai ditentukan berdasarkan gaya seismik lateralnya, F_x , dengan persamaan yang digunakan untuk semua tingkat sesuai

$$F_x = c_{vx} V \quad (2.23)$$

$$C_{vx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2.24)$$

Keterangan:

F_x = Gaya seismik lateral (kN)

C_{vx} = Faktor distribusi vertikal

V = Gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (kN)

w_i, W_x = Berat seismik efektif total struktur yang dikenakan pada tingkat i atau x

h_i, h_x = Tinggi dasar sampai tingkat I atau x (m)

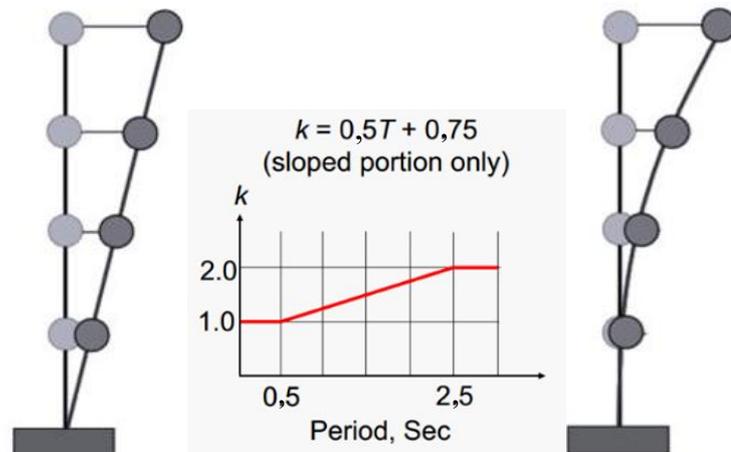
k = Eksponen yang terkait dengan perioda struktur

6. Nilai Eksponen (k)

Nilai eksponen dapat ditentukan berdasarkan poin berikut:

- untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, = 1
- untuk struktur dengan $T \geq 2,5$ detik, = 2
- untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, = 2 atau ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

Bentuk eksponen terkait dengan periode struktur (k) dapat dilihat pada Gambar 2.7 dengan mode translasi dan kombinasi ragam tinggi.



Gambar 2.7 Eksponen yang Terkait dengan Periode Struktur

2.3.5 Beban Kombinasi

Untuk mengetahui kekuatan struktur rencana maka diperlukan pembebanan pada beberapa kondisi yang dapat menggunakan persamaan berdasarkan pada Tabel 2.13 berikut:

Tabel 2.13 Kuat Perlu Beban Kombinasi (SNI 2847:2019)

Nama Kombinasi	Rumus Kombinasi
Kombinasi 1 untuk menahan beban mati, D	1,4D

Nama Kombinasi	Rumus Kombinasi
Kombinasi 2 untuk menahan beban mati D, beban hidup L, dan beban atap L_r atau beban hujan R	$1,2D + 1,6L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
Kombinasi 3 jika beban hujan atau beban di atap yang utama	$1,2D + 1,6 (L_r \text{ atau } R) \pm (1,0L + 0,5W)$
Kombinasi 4 jika beban angin yang utama	$1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
Kombinasi 5 bila ketahanan struktur terhadap gempa E perlu diperhitungkan	$1,2 D + 1,0 L \pm 1,0 E$
Kombinasi 7 bila ketahanan struktur terhadap Angin, W perlu diperhitungkan	$0,9 D \pm 1,0 W$
Kombinasi 7 bila ketahanan struktur terhadap gempa, E perlu diperhitungkan	$0,9 D \pm 1,0 E$

2.4 Perencanaan Struktur Atas

2.4.1 Pelat

Pelat secara umum pada suatu bangunan dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu pelat lantai dan pelat atap, dimana pembebanan yang dipikul juga berbeda satu sama lainnya.

2.4.1.1 Preliminary Design Pelat

Pelat dibagi menjadi dua jenis yaitu pelat searah dan pelat dua arah dengan nilai yang dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$\frac{I_p}{b_p} > 2 \text{ (satu arah)} \quad (2.25)$$

$$\frac{I_p}{b_p} \leq 2 \text{ (dua arah)} \quad (2.26)$$

Keterangan:

l_p, b_p = bentang bersih terpanjang dan bentang bersih terpendek

Berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 7.3.1.1 tebal minimum pelat satu arah (*one way slab*) dapat dilihat pada Tabel 2.14.

Tabel 2.14 Ketebalan Minimum Pelat Satu Arah

Kondisi Tumpuan	h minimum
Tumpuan sederhana	$l/20$
Satu ujung menerus	$l/24$
Kedua ujung menerus	$l/28$
Kantilever	$l/10$

Sedangkan, tebal minimum pelat dua arah (*two way slab*) diketahui mempunyai balok di semua sisinya sesuai dengan SNI 2847:2019 Tabel 8.3.1.2 seperti pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah (Balok Disemua Sisinya)

α_{fm}	h minimum	
$\alpha_{fm} \leq 0,2$	Pasal 8.3.1.1 berlaku	
$0,2 < \alpha_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari	$\frac{\ln\left(0,8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0,2)}$
		125
$\alpha_{fm} > 2,0$	Terbesar dari	$\frac{\ln\left(0,8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 9\beta}$
		90

Jika SNI 2847:2019 Pasal 8.3.1.1 berlaku maka tebal minimum pelat dua arah yang dapat dijadikan perencanaan yaitu sesuai pada Tabel 2.16:

Tabel 2.16 Ketebalan minimum Pelat Dua Arah $\alpha_{fm} \leq 0,2$

f_y , MPa	Tanpa <i>Drop Panel</i>			Dengan <i>Drop Panel</i>		
	Panel Eksterior		Panel Interior	Panel Eksterior		Panel Interior
	Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi		Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi	
280	$\ell_n/33$	$\ell_n/36$	$\ell_n/36$	$\ell_n/36$	$\ell_n/40$	$\ell_n/40$
420	$\ell_n/30$	$\ell_n/33$	$\ell_n/33$	$\ell_n/33$	$\ell_n/36$	$\ell_n/36$
520	$\ell_n/28$	$\ell_n/31$	$\ell_n/31$	$\ell_n/31$	$\ell_n/34$	$\ell_n/34$

2.4.1.2 Penulangan Pelat

Perilaku pelat dalam hal ini menyerupai konsep balok. Analisis momen terfaktor (M_u) dan geser terfaktor (V_u) diambil dari analisis menggunakan pada *software*. Berdasarkan SNI 2847:2019 luas minimum tulangan lentur (A_{smin}) pelat harus disediakan sesuai Tabel 2.17 dengan luas penampang total dihitung dengan persamaan berikut:

$$A_g = b \cdot h \quad (2.27)$$

Keterangan:

A_g = Luas Penampang total

b = lebar pelat per satuan meter

h = tebal pelat (mm)

Tabel 2.17 Minimum Tulangan Lentur (A_{smin}) Pelat Satu Arah

Tipe Tulangan	F_y (MPa)	A_{smin}
Batang ulir	< 420	$0,002A_g$
Batang ulir atau kawat las	≥ 420	$\frac{0,0018 \cdot 420}{f_y} A_g$
		$0,0014A_g$

Untuk tulangan harus kurang dari 3h dan 450 mm. Spasi tulangan susut (rasio tulangan) dan suhu berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 24.4.3.3., tidak boleh melebihi nilai terkecil antara 5h dan 450 mm.

2.4.1.3 Kontrol Lendutan Pelat

1. Seketika

Berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2, batasan lendutan seketika pelat lantai akibat beban hidup (LL) adalah $L/360$. Lendutan seketika terjadi ketika mengalami beban yang pada saat itu juga terjadi lendutan. Momen inersia efektif (I_e) berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 24.2.3.5, dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} < I \quad (2.28)$$

$$f_{cr} = 0,62 \sqrt{f'_c} \quad (2.29)$$

$$M_{cr} = \frac{f_{cr} I_g}{y} \quad (2.30)$$

Keterangan:

M_{cr} = momen pada saat timbul retak yang pertama (sesuai SNI 2847:2019 Pasal 24.2.3.5)

M_a = momen maksimum pada komponen struktur saat lendutan dihitung

f_{cr} = tegangan retak beton (sesuai SNI 2847:2019 Pasal 24.5.2.1)

y = jarak dari garis netral penampang utuh (tebal pelat (t_p) / 2)

I_g = $1/12.b.t_p^3$ (momen inersia penampang utuh)

I_{cr} = $0,25I_g$ (momen inersia penampang retak sesuai dengan SNI 2847-2019; Pasal 6.6.3.1.1)

Jika $M_{cr}/M_a > 1$ maka pelat tidak retak, sehingga digunakan $M_{cr} = M_u$ dan $I_{cr} = I_g$. Dan, jika $M_{cr}/M_a \leq 1$ maka pelat retak, sehingga nilai I_e harus dihitung. Persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung lendutan seketika adalah sebagai berikut (Dipohusodo, 1993):

$$\delta_i = \frac{5L^2}{48E_c I_g} [M_m - 0,1(M_a + M_b)], \text{ untuk pelat menerus} \quad (2.31)$$

$$\delta_i = \frac{5L^2}{48E_c I_g} [M_m + 0,2M_{\text{tump}}], \text{ jika momen tumpuan kanan dan kiri sama} \quad (2.32)$$

Keterangan:

δ_i = lendutan seketika ditengah bentang

L = panjang pelat

E_c = modulus elastisitas beton

I_g = momen inersia rata-rata ($(I_{\text{elap.}} + I_{\text{etump.}})/2$)

M_a, M_b = momen lentur negatif di tumpuan

M_m = momen di lapangan (tengah bentang)

2. Jangka Panjang

Penyebab lendutan dengan jangka waktu yang panjang yaitu karena susutnya beton, perhitungannya berdasarkan perkalian faktor (λ_{Δ}) yang ditentukan dari SNI 2847:2019 Pasal 24.2.4.1.1 dengan persamaan sebagai berikut:

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1 + 50\rho} \quad (2.33)$$

Keterangan:

ξ = Faktor ketergantungan waktu untuk beban tetap (sesuai dengan SNI 2847:2019 Pasal 24.2.4.1.3)

ρ = As/bd (rasio tulangan)

Sehingga, persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung nilai lendutan jangka panjang adalah:

$$\Delta_{LT} = \left(\delta_{i_{DL+SDL}} \right) \lambda_{\Delta} + \delta_{i_{LL}} \quad (2.34)$$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2, batasan lendutan jangka panjang pelat lantai akibat semua beban tetap dan lendutan seketika akibat penambahan beban hidup adalah L/240.

2.4.2 Balok

Balok adalah suatu elemen struktur yang dapat menyalurkan beban-beban yang terdistribusi dari pelat lantai ke kolom penyangga vertikal. Beban yang bekerja pada balok biasanya berupa beban lentur, beban geser maupun torsi, sehingga perlu baja tulangan untuk menahan beban-beban tersebut khususnya di bagian yang berpotensi mengalami tarik saat menahan beban.

2.4.2.1 Preliminary Design Balok

Penentuan lebar dan tinggi balok sudah ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 dengan lebar minimum balok (b_w) sekurangnya harus nilai terkecil dari $0,3h$ dan 250 mm. Sedangkan untuk tinggi minimum balok dapat dilihat pada Tabel 2.18 Tinggi Minimum Balok Tabel 2.18 sebagai berikut:

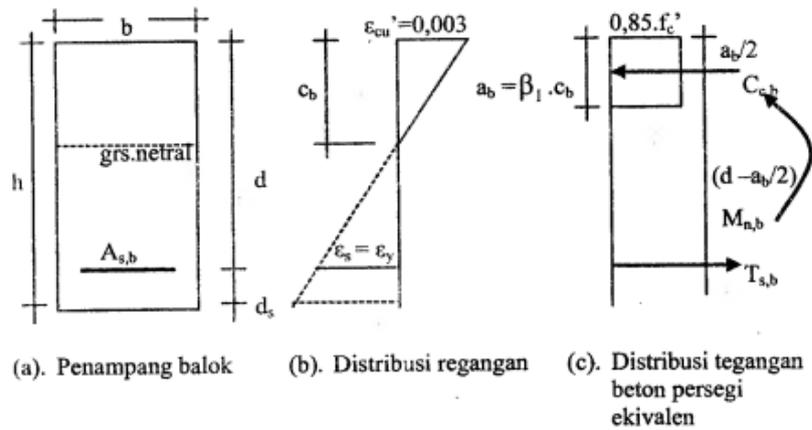
Tabel 2.18 Tinggi Minimum Balok

Kondisi Perletakan	Tinggi Minimum Balok (h)
Perletakan Sederhana	$l/16$
Menerus Satu Sisi	$l/18,5$
Menerus Dua Sisi	$l/21$
Kantilever	$l/8$

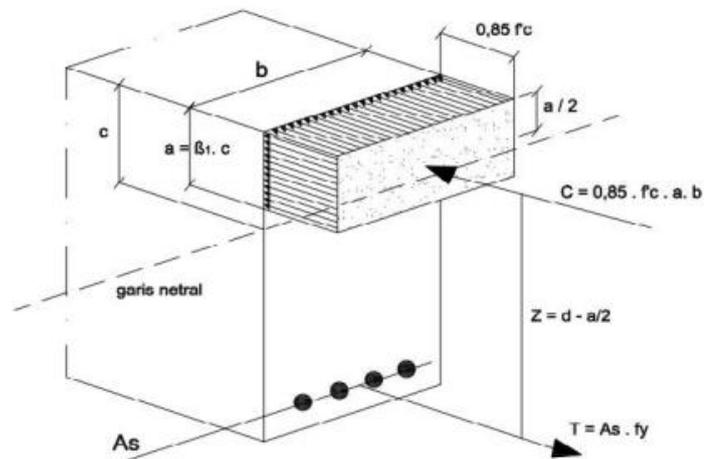
2.4.2.2 Kuat Lentur Balok

1. Penampang Beton Tulangan Tunggal

Berdasarkan Gambar 2.8 dan Gambar 2.9 dari buku milik Asroni Tahun 2010 diketahui, gaya tekan c_b sebesar yaitu volume balok tegangan beton tekan pada atau dekat keadaan batas bila baja ditarik telah leleh ($\epsilon_s > \epsilon_y$).



Gambar 2.8 Penampang Beton pada Kondisi Keruntuhan Seimbang



Gambar 2.9 Tegangan Ekuivalen untuk Perencanaan dan Analisis Kekuatan

Persamaan kesetimbangan gaya tekan dan gaya tarik baja T dapat ditulis:

$$C = T$$

$$0,85 f'c \times b \times a = A_s \times f_y \quad (2.35)$$

Dimana, hubungan antara tinggi balok tegangan segi empat ekuivalen a dengan sumbu netral c adalah:

$$a = \beta_1 \times c \quad (2.36)$$

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0,85 f'c \times b} \quad (2.37)$$

Keterangan:

C = Resultan gaya tekan pada beton

T = Resultan gaya tarik pada tulangan

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

b = Lebar muka tekan komponen struktur

A_s = Luas tulangan tarik

f_y = Kekuatan leleh tulangan baja (MPa)

a = Tinggi balok tegangan persegi beton ekuivalen

β_1 = Faktor pembentuk tegangan beton tekan persegi ekuivalen, yang bergantung pada mutu beton ($f'c$)

c = Jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan

Besarnya faktor tinggi balok tegangan ekuivalen berbentuk persegi empat, β_1 adalah sebagai berikut:

- $\beta_1 = 0,85$ untuk $17 \text{ MPa} < f'c \leq 28 \text{ MPa}$
- $\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left(\frac{f'c - 28}{7} \right)$ untuk $28 \text{ MPa} < f'c \leq 56 \text{ MPa}$
- $\beta_1 = 0,65$ untuk $f'c > 56 \text{ MPa}$

Untuk persamaan momen tahanan penampang, yaitu kekuatan nominal (M_n)

$$M_n = (A_s \times f_y)z \quad \text{atau} \quad M_n = (0,85 \times f'c \times b \times a)z \quad (2.38)$$

Di mana z yaitu $= d - \frac{a}{2}$

Keterangan:

M_n = Momen nominal

A_s = Luas tulangan tarik

f_y = Kekuatan leleh tulangan baja (MPa)

$f'c$ = Kuat tekan beton

b = Lebar muka tekan komponen struktur

a = Tinggi tegangan pada beton

z = lengan momen

- d = Jarak serat tekan ke pusat tulangan tarik
 a = Tinggi blok tegangan persegi

Berdasarkan jenis keruntuhan yang dialami dapat dikelompokkan ke dalam 3 kelompok sebagai berikut :

a. Penampang Seimbang,

Tulangan tarik akan hancur karena tekan apabila mencapai regangan batasnya. Pada awal terjadinya keruntuhan, regangan tekan yang diizinkan pada serat tepi yang tertekan adalah 0,003. Sedangkan regangan baja sama dengan regangan lelehnya. Beton merupakan material yang getas sehingga dapat mengakibatkan keruntuhan mendadak. Angka tulangan seimbang, hubungan antara tinggi sumbu netral (c) dan tinggi efektif (d) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{Cb}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \left(\frac{f_y}{E_s}\right)} \quad (2.39)$$

Jika $E_s = 200.000$ MPa, maka:

$$\frac{Cb}{d} = \frac{600}{600 + f_y} \quad (2.40)$$

Keterangan:

Cb = Jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan dalam keadaan seimbang

d = Jarak serat tekan ke pusat tulangan tarik

f_y = Kekuatan leleh tulangan baja (MPa)

E_s = Modulus elastisitas baja tulangan

Berdasarkan persamaan $0,85 f'c \times b \times a = A_s \times f_y$ (2.35) dan persamaan sebelumnya, maka angka tulangan seimbang menjadi:

$$\rho_b = \beta_1 \times \frac{0,85 \times f'c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \quad (2.41)$$

Keterangan:

- b = Rasio As terhadap bd
 β_1 = Faktor pembentuk tegangan beton tekan persegi ekuivalen
 f_y = Kekuatan leleh tulangan baja (MPa)
 f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

b. Penampang Bertulangan Lemah/Minimum (*Under Reinforced*)

Keruntuhan ditandai dengan terjadinya leleh pada tulangan baja yang terus bertambah panjang dengan bertambahnya regangan di atas. Kondisi ini dapat terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi seimbang. Keadaan ini tulangan tarik akan mendahului regangan luluhnya sebelum beton mencapai regangan maksimum 0,003. SNI 2847:2019 mensyaratkan penggunaan tulangan tarik dengan rasio penulangan minimal:

$$\rho_{\min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4 \times f_y} \quad (2.42)$$

Dan tidak boleh lebih kecil dari:

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.43)$$

Keterangan:

- ρ_{\min} = Rasio minimum as terhadap bd
 f_y = Kekuatan leleh tulangan baja (MPa)
 f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

c. Penampang Bertulangan Lebih/Maksimum (*Over Reinforced*)

Hancurnya beton yang tertekan maka itu tanda keruntuhan penampang bertulang lebih. Pada saat awal keruntuhan, regangan baja yang terjadi masih lebih kecil daripada regangan lelehnya. Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak daripada yang diperlukan dalam keadaan seimbang. Sehingga dengan analisis geometri pada diagram regangan dapat diperoleh:

$$\rho_{\max} = \frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,003 + \varepsilon_s} \rho_b \quad (2.44)$$

Atau,

$$\rho_{\max} = 0,025 \quad (2.45)$$

$$\varepsilon_s = 0,003 \times \frac{d - c}{c} \quad (2.46)$$

Keterangan:

ε_s = regangan tarik baja tulangan

d = Jarak serat tekan ke pusat tulangan tarik

c = Jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan

Selanjutnya dapat didefinisikan suatu koefisien kapasitas penampang atau koefisien lawan yang diberikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$R_n = \frac{M_n}{b \times d^2} = \rho \times f_y \times \left(1 - \frac{1}{2} \times \rho \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c} \right) \quad (2.47)$$

Keterangan:

R_n = Koefisien kapasitas penampang

ρ = Rasio As terhadap bd

f_y = Kekuatan leleh tulangan baja (MPa)

d = Jarak serat tekan ke pusat tulangan Tarik (mm)

b = Lebar muka tekan komponen struktur (mm)

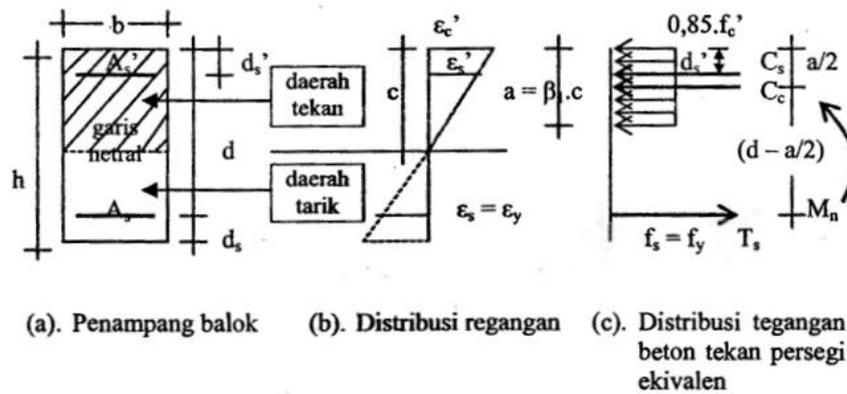
m = perbandingan tegangan

Berdasarkan persamaan (2.44) Perhatikan bahwa R_n hanya tergantung dari pada ρ , f_y dan f'_c . Untuk b dan d yang diketahui, maka Rasio Tulangan (ρ) dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\rho = 0,85 \frac{f'_c}{f_y} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0,85f'_c}} \right) \quad (2.48)$$

2. Penampang Beton Tulangan Rangkap

Pada perencanaan beton bertulang, regangan tulangan tarik selalu diperhitungkan sudah leleh, yaitu $\epsilon_s = \epsilon_y$ dengan $\epsilon_y = \frac{fy}{Es}$ atau $\epsilon_y = \frac{fy}{200000}$. Sedangkan untuk tulangan tekan, regangan tulangan tekan (ϵ_s') belum tentu leleh. Pada balok bertulang rangkap, kekuatan nominal penampang balok bertulang dianggap sebagai akumulasi dua momen kopel internal yang bekerja akibat adanya komponen gaya horizontal pada baja tulangan tarik (T), gaya tekan pada balok tegangan tekan ekuivalen beton (C), dan gaya tekan pada baja tulangan tekan (Cs). Sehingga dapat distribusi regangan dan tegangan yang dapat dilihat pada Gambar 2.10 (Asroni, 2010).



Gambar 2.10 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Rangkap

keuntungan penggunaan balok tulangan rangkap yaitu dapat mengurangi lendutan dan meningkatkan daktilitas sehingga menghasilkan keruntuhan tarik pada struktur. Pada kondisi tekan terdapat dua keadaan yaitu ketika sebelum dan sesudah luluh.

a. Tulangan Tekan Ketika Sudah Luluh

Kapasitas nominal penampang dapat dihitung sebagai jumlah antara komponen momen nominal pertama dan kedua, sebagaimana dinyatakan dalam formulasi berikut:

$$M_n \text{ total} = M_{n1} + M_{n2} \quad (2.49)$$

$$Mn_1 = As_1 \times fy \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.50)$$

$$Mn_2 = As' \times fy \times (d - d') \quad (2.51)$$

Keterangan:

Mn_1 = Momen lentur nominal pada penampang (Nmm)

As = Luas tulangan Tarik (mm^2)

As' = Luas tulangan Tekan (mm^2)

fy = Kekuatan leleh tulangan baja (MPa)

d = Jarak serat tekan ke pusat tulangan Tarik (mm)

a = Tinggi tegangan pada beton (mm)

Sedangkan tulangan tekan ketika sudah luluh harus memenuhi persamaan berikut:

$$\epsilon'_s \geq \epsilon_s \quad (2.52)$$

$$0,003 \left(\frac{c - d'}{c} \right) \geq \frac{fy}{Es} \quad (2.53)$$

Dimana,

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{As - As' \times fy}{\beta_1 \times 0,85 \times f'c \times b} = \frac{\rho - \rho' \times fy \times d}{0,85 \times \beta_1 \times f'c} \quad (2.54)$$

Maka, dapat disimpulkan rumus tulangan tekan yang mengalami luluh adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} - \frac{0,85 \times \beta_1 \times f'c \times d'}{\rho - \rho' \times fy \times d} &\geq \frac{fy - 600}{600} \\ \rho - \rho' &\geq 0,85 \times \beta_1 \times \frac{f'c \times d'}{fy \times d} \times \frac{600}{600 - fy} \end{aligned} \quad (2.55)$$

Keterangan:

β_1 = Faktor pembentuk tegangan beton tekan persegi ekuivalen, yang bergantung pada mutu beton ($f'c$)

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

d = Jarak serat tekan ke pusat tulangan Tarik (mm)

d' = Jarak serat tekan ke pusat tulangan Tarik (mm)

f_y = Kekuatan leleh tulangan baja (MPa)

ρ = Rasio As terhadap bd

ρ' = Rasio As' terhadap bd

Maka, persamaan M_n total = $M_{n_1} + M_{n_2}$ (2.49) menjadi,

$$M_n = (A_{s_1} \times f_y - A_{s'} \times f_{s'}) \left(d - \frac{a}{2} + A_{s'} \times f_{s'} \times (d - d') \right) \quad (2.56)$$

b. Tulangan Tekan Ketika Sebelum Luluh

Umumnya luluhnya tulangan tekan dipengaruhi oleh letaknya terhadap serat terluar (d'), semakin tinggi rasio d'/c maka tulangan tekan semakin dekat dengan sumbu netral dan semakin kecil kemungkinan tulangan tekan mencapai kuat luluhnya. Sehingga, perhitungan tulangan sebelum luluh hampir sama dengan sesudah luluh, yaitu:

$$\rho - \rho' < 0,85 \times \beta_1 \times \frac{f'c \times d'}{f_y \times d} \times \frac{600}{600 - f_y} \quad (2.57)$$

Dengan persamaan kuat momen rencana penampang sebagai berikut:

$$\phi M_n = \phi \left[C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \right] \quad (2.58)$$

Jika tulangan tekan belum luluh ($f_{s'} < f_y$), maka luas tulangan tarik total yang dibutuhkan penampang persegi yaitu:

$$A_s = bd \left(\rho_{\max} + \frac{\rho' f_{s'}}{f_y} \right) \quad (2.59)$$

2.4.2.3 Kuat Geser Balok

Selain memikul gaya lentur pada elemen, balok juga akan memikul gaya geser yang umumnya ditandai dengan adanya lendutan kecil serta kurangnya daktilitas yang akan mengakibatkan struktur runtuh tiba-tiba. Perhitungan kuat

geser pada balok mengikuti prosedur SNI 2847:2019 dengan beberapa persamaan yang digunakan yaitu:

1. Kuat geser nominal penampang, V_n

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.60)$$

Keterangan:

V_n = Gaya geser nominal (N)

V_c = Gaya geser yang ditahan oleh beton (N)

V_s = Gaya geser yang ditahan oleh begel (N)

2. Ukuran dimensi penampang harus memenuhi syarat

$$V_u \leq \phi(V_c + 0,066\sqrt{f'_c} \times b_w \times d) \quad (2.61)$$

3. Gaya geser yang ditahan beton (V_c) tanpa gaya aksial

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (2.62)$$

4. Gaya geser yang ditahan beton (V_c) dengan gaya aksial tekan

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (2.63)$$

Apabila N_u bernilai positif untuk tekan diambil dari nilai terkecil dari persamaan berikut:

$$V_c = \left[0,16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{4h-d}{8}} \right] b_w \times d \quad (2.64)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f'_c} \times b_w \times d \times \sqrt{1 + \frac{0,29N_u}{A_g}} \quad (2.65)$$

Keterangan:

λ = faktor modifikasi, untuk beton normal = 1,0

ρ_w = rasio tulangan tarik ($A_s/b_w.d$)

V_u = gaya geser ultimate hasil analisis struktur (N)

M_u = momen ultimate hasil analisis struktur (Nmm)

b_w = lebar penampang balok (mm)

d = tinggi efektif balok (mm)

5. Gaya geser yang ditahan beton (V_c) dengan gaya aksial tarik

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{3,5A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (2.66)$$

6. Jika $V_u > \phi V_c$, tulangan transversal harus dipasang dan memenuhi persamaan berikut

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.67)$$

Dengan,

$$V_s = \frac{A_g f_y d}{d} \quad (2.68)$$

7. Gaya geser maksimum yang dipikul tulangan geser, V_s

$$V_s \leq 0,66 \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (2.69)$$

8. Batasan minimum tulangan geser harus diambil dari yang terbesar sesuai persamaan berikut

$$A_{vmin} = 0,062 \sqrt{f'_c} \times \frac{b_w s}{f_y} \quad (2.70)$$

Atau

$$A_{vmin} = \frac{b_w s}{f_y} \quad (2.71)$$

9. Perhitungan spasi begel (s)

a. $s = \frac{d}{2} \leq 600$ mm, jika $V_s < V_{c1}$

b. $s = \frac{d}{4} \leq 300$ mm, jika $V_{c1} < V_c < V_{c2}$

$$c. S_{\max} = \frac{A_{\sqrt{f'_c}} f_y}{0,062 \sqrt{f'_c} \times b_w} \text{ jika } f'_c > 30 \text{ MPa} \quad (2.72)$$

$$d. S_{\max} = \frac{A_{\sqrt{f'_c}} f_y}{0,35 \times b_w} \text{ jika } f'_c < 30 \text{ MPa} \quad (2.73)$$

2.4.2.4 Momen Torsi Balok

Menurut SNI 2847:2019 Momen puntir merupakan momen yang bekerja terhadap sumbu longitudinal balok yang terjadi karena adanya beban eksentrik yang bekerja pada elemen. Dalam analisis torsi terdapat batasan mutu material, yaitu mutu beton bertulang $\sqrt{f'_c} \leq 8,3 \text{ MPa}$. Kemudian mutu tulangan harus memenuhi syarat, f_y atau $f_{yt} \leq 420 \text{ MPa}$. Pengaruh torsi dapat diabaikan apabila T_u memenuhi syarat berikut:

$$T_u \leq \phi T_{th} \quad (2.74)$$

$$T_u \leq \phi 0,083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (2.75)$$

Atau tidak melebihi:

$$T_u \leq \phi 0,083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0,33 A_g \lambda \sqrt{f'_c}}} \quad (2.76)$$

Keterangan:

T_u = nilai torsi terfaktor dari hasil analisis struktur (Nmm)

T_{th} = nilai torsi *threshold* (Nmm)

ϕ = faktor reduksi (0,75)

A_{cp} = luas yang dibatasi oleh keliling penampang beton (m^2)

P_{cp} = keliling luar penampang beton (mm)

Terdapat batasan dimensi penampang yang memikul torsi dan gaya geser menurut SNI 2847:2019 Pasal 22.7.7, persamaan penampang solid sebagai berikut:

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \times P_h}{1,7A_{oh}^2}\right)} \leq \phi \left(\frac{V_u}{b_w d} + 0,66\sqrt{f'c}\right) \quad (2.77)$$

Keterangan:

A_{oh} = luas daerah dalam tulangan geser (mm^2)

P_h = keliling daerah dalam tulangan geser (mm)

Apabila tulangan torsi diperlukan, maka harus dicek terhadap syarat tulangan torsi minimal yang disyaratkan SNI 2847:2019 sebagai berikut:

1. Tulangan Transversal/Senggang

Luasan minimum yang diambil harus lebih besar dari persamaan berikut:

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{\min}}{s} \geq 0,062\sqrt{f'c} \times \frac{b_w s}{f_{y_t}} \quad (2.78)$$

Dan

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{\min}}{s} \geq 0,35 \times \frac{b_w s}{f_{y_t}} \quad (2.79)$$

Keterangan:

A_t = luas satu kaki tulangan sengkang tertutup untuk geser

A_y = luas satu kaki tulangan sengkang tertutup untuk torsi

s = jarak antar tulangan sengkang

f_{y_t} = kuat luluh tulangan sengkang ≤ 400 MPa

Untuk nilai A_v didapatkan dari luasan tulangan geser yang dihitung dengan persamaan geser. Sedangkan, nilai A_t dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$A_t = \frac{T_u \times s}{\phi 2A_0 f_{y_t}} \tan\theta \quad (2.80)$$

Jarak tulangan sengkang (s) tidak boleh melebihi $P_h / 8$ atau 300 mm.

2. Tulangan Longitudinal/memanjang

Luasan minimum yang diambil harus lebih besar dari persamaan berikut:

$$A_{lmin} = 0,42\sqrt{f'c} \times \frac{A_{cp}}{f_{y_t}} - \left(\frac{A_t}{s}\right)P_h \times \frac{f_{y_t}}{f_y} \quad (2.81)$$

Dan

$$A_{lmin} = 0,42\sqrt{f'c} \times \frac{A_{cp}}{f_{y_t}} - \left(\frac{0,175b_w}{f_{y_t}}\right)P_h \times \frac{f_{y_t}}{f_y} \quad (2.82)$$

Maka, Luasan tulangan longitudinal (A_l) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$A_l = \left(\frac{A_t}{s}\right)P_h \times \left(\frac{f_{y_t}}{f_y}\right)\cot^2\theta \quad (2.83)$$

$$A_l = \frac{T_u \cdot P_h}{\phi 2 A_o f_y} \cot\theta \quad (2.84)$$

Jarak tulangan sengkang (s) tidak boleh melebihi $bt + d$

2.4.2.5 Selimut Beton

Untuk melindungi tulangan dari paparan cuaca luar atau kontak dengan tanah langsung, maka selimut beton diperlukan. Menurut SNI 2847:2019 komponen struktur beton yang dicor di tempat harus mempunyai selimut beton yang sekurang-kurangnya seperti pada Tabel 2.19.

Tabel 2.19 Ketebalan Selimut Beton

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 Ø13 atau D13 yang lebih kecil	40

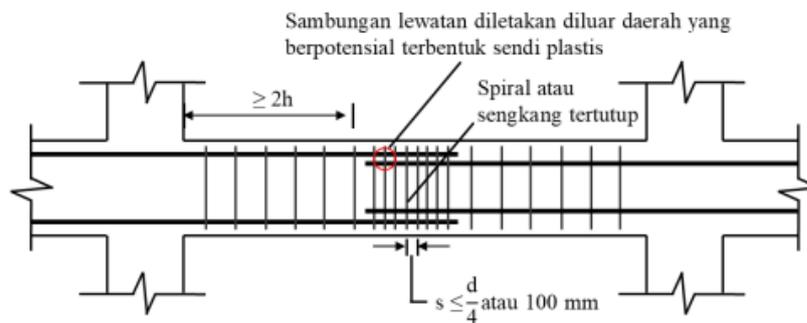
Paparan	Komponen Struktur	Tulangan	Ketebalan Selimut (mm)
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Batang D43 dan D57	40
		Batang D36 dan yang lebih kecil	20
	Balok, kolom, pedestal dan batang tarik	Tulangan utama, sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengekang	40

2.4.2.6 Syarat Perencanaan Balok SRMPK

Perencanaan balok Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRMPK) sudah disyaratkan seluruhnya pada SNI 2847:2019 Pasal 18.6, dengan pembahasan yang berbeda tiap poinnya yaitu dimensi, tulangan, dan kuat geser.

1. Syarat Dimensi Balok SRMPK
 - a. Bentang bersih, $l_n \geq 4d$; d = tinggi efektif penampang balok.
 - b. Lebar penampang balok, $b_w \geq 0,3 h$ atau 250 mm.
 - c. Proyeksi lebar balok yang melampaui lebar kolom penumpu $\leq c_2$ dan $0,75c_1$ pada masing-masing sisi kolom.
2. Syarat Tulangan Longitudinal Balok SRMPK
 - a. Balok harus memiliki minimal dua batang tulangan menerus pada sisi atas dan bawa pada penampang.
 - b. Jumlah tulangan kurang dari yang disyaratkan pada Pasal 9.6.1.2 dan rasio tulangan (ρ) $\leq 0,025$.
 - c. Pada muka kolom kuat momen $Mn^+ \geq 1/2 (Mn^-)$.
 - d. Pada semua penampang di sepanjang bentang balok kuat momen (Mn^+) atau (Mn^-) $\geq 1/4 (M_{max})$.
 - e. Sambungan lewatan tulangan longitudinal balok diizinkan jika transversal pengekang dipasang sepanjang sambungan lewatan. Spasi sengkang pada daerah tersebut $\leq d/4$ dan 100 mm. Kemudian, sambungan lewatan tidak boleh berada pada hubungan balok kolom dan daerah sendi plastis ($2h$), yang mana pelelehan lentur memungkinkan terjadi sebagai akibat

deformasi lateral yang melampaui perilaku elastik. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Persyaratan Sambungan Lewatan Balok SRPMK

3. Syarat Tulangan Transversal Balok SRPMK
 - a. Sengkang pengekan harus dipasang sepanjang jarak sama dengan $2h$ (sendi plastis) yang diukur dari muka kolom penumpu ke arah tengah bentang kedua ujung balok.
 - b. Sengkang pertama pada daerah sendi plastis dipasang ≤ 50 mm dari muka kolom penumpu.
 - c. Jarak tulangan sengkang sepanjang sendi plastis harus dipasang kurang dari sama dengan nilai terkecil $d/4$, $6.d_b$ (diameter tulangan utama balok), dan 150 mm.
 - d. Sengkang harus dipasang dengan spasi tidak lebih dari $d/2$ di sepanjang bentang balok diluar sendi plastis.
 - e. Sengkang pengekan pada balok yang diizinkan terdiri dari dua batang tulangan, yaitu sengkang yang mempunyai kait gempu pada kedua ujungnya dan ikat silang sebagai penutup. Ikat silang berurutan yang mengikat batang tulangan longitudinal yang sama harus memiliki kait 90 derajat yang dipasang selang-seling pada sisi yang berlawanan dari komponen struktur lentur.
4. Syarat Kekuatan Geser Balok SRPMK
 - a. Gaya geser desain (V_e) harus dihitung dari gaya-gaya pada bagian balok diantara kedua *joint*. Momen-momen dengan tanda berlawanan yang terkait dengan kekuatan momen lentur maksimum yang mungkin terjadi (M_{pr}), harus diasumsikan bekerja pada muka-muka *joint*, dan balok

dibebani dengan beban gravitasi tributari terfaktor di sepanjang bentangnya. Momen-momen ujung M_{pr} ditentukan berdasarkan pada tegangan tarik baja sebesar $1,25f_y$ sesuai yang disyaratkan.

- b. Tulangan geser sepanjang daerah sendi plastis ($2h$) harus didesain untuk menahan geser dengan asumsi nilai $V_c = 0$, apabila kedua syarat berikut terpenuhi:
- 1) Gaya geser akibat beban gempa (V_e) mewakili setidaknya 50% kekuatan geser perlu maksimum dalam bentang tersebut.
 - 2) Gaya tekan aksial terfaktor (P_u) pada elemen balok termasuk pengaruh gempa harus $< A_g f'_c / 20$.

2.4.3 Kolom

Kolom merupakan elemen struktur yang mampu menerima beban dari balok dan pelat. Umumnya elemen kolom dan balok di cor secara monolit dengan pelat dan secara strukturnya dipasang tulangan di bagian bawah dan atas, serta tulangan sengkang di bagian samping.

2.4.3.1 Preliminary Design Kolom

Pada semua lantai dan atap yang terdapat kolom didesain mampu menahan gaya aksial beban terfaktor yang dihitung menggunakan metode perlimpahan beban dari pelat dan balok. Untuk mencari luas penampang menurut SNI 2847:2019 dapat ditentukan dari persamaan (2.84) dengan nilai ϕ yang diambil berdasarkan Pasal 21 yaitu 0,3.

$$\sigma = \phi \cdot f'_c = \frac{P_u}{A_g} \quad (2.85)$$

Sehingga,

$$A_g = \frac{P_u}{0,3 \cdot f'_c} \quad (2.86)$$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.2.1 mengenai batasan dimensi kolom tidak boleh kurang dari 300 mm dan rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurusnya tidak kurang dari nilai 0,4.

2.4.3.2 Kolom Beton dengan Beban Aksial Tekan Sentris

Kolom dianggap menerima beban sentris pada pusat penampang. Beban aksial tekan apabila diberikan pada kolom pendek beton bertulang, beton akan berperilaku elastis hingga batas tegangan mencapai sekitar $1/3f'_c$, apabila beban pada kolom ditingkatkan hingga batas ultimit, beton akan mencapai kekuatan maksimumnya dan tulangan baja akan mencapai luluhnya (f_y). Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 22.4.2.2 kuat penampang kolom (P_o) dihitung dengan persamaan (2.86). Rasio tulangan harus dalam rentang 1% - 8%.

$$P_o = 0,85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y \quad (2.87)$$

Keterangan:

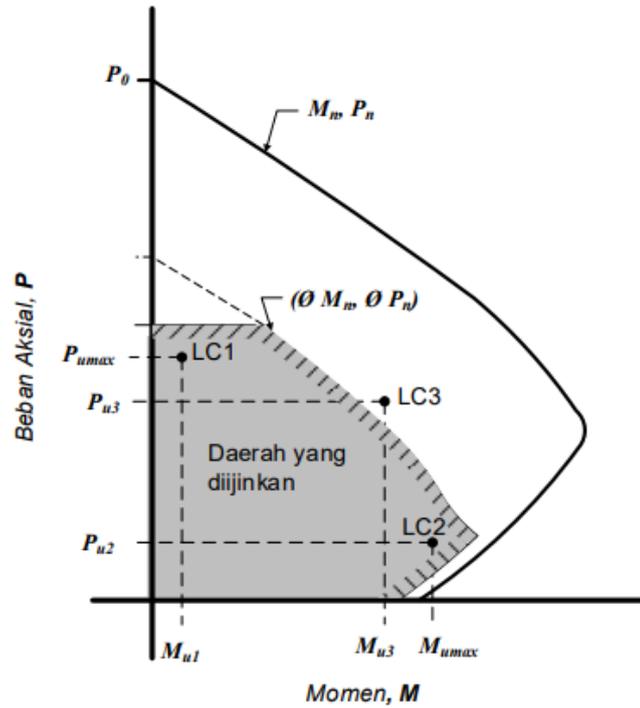
A_g = Luas total penampang kolom

A_{st} = Luas tulangan baja

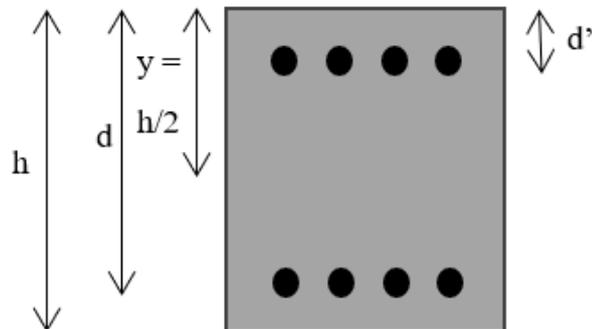
Batasan untuk kekuatan tekan aksial nominal (P_n) tidak boleh melebihi P_{nmax} , dengan nilai untuk sengkang persegi jika dikalikan dengan $\phi 0,80(P_o)$ dan untuk spiral $\phi 0,85(P_o)$. Dengan ϕ sengkang persegi yaitu 0,65 dan ϕ untuk sengkang spiral yaitu 0,75.

2.4.3.3 Kolom Beton Kombinasi dengan Beban Aksial Tekan dan Momen Lentur

Metode yang lebih baik untuk keperluan praktis desain dengan menggambarkan diagram interaksi yang memberikan beban runtuh atau gaya aksial tekan (P) dan momen runtuh (M) dari suatu penampang kolom, untuk setiap eksentrisnya dari nol sampai tak hingga. Sehingga, gambar diagram interaksi kolom dengan beban aksial dan momen lentur dapat dilihat pada Gambar 2.12 (Asroni, 2010).



Gambar 2.12 Diagram Interaksi Kolom dengan Beban Aksial dan Momen Lentur



Gambar 2.13 Penampang Melintang Kolom

Jika kolom menerima beban tekan eksentris, maka kolom akan menerima pengaruh tekan sekaligus momen. Gaya tahan nominal (P_n) dalam keadaan runtuh dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_n = C_c + C_s - T \quad (2.88)$$

$$P_n = 0,85f'_c \cdot a \cdot b + A'_s f'_s - A_s f_s \quad (2.89)$$

Sedangkan momen nominal (M_n) dapat diperoleh dengan menuliskan keseimbangan momen terhadap pusat plastis penampang kolom. Jika tulangan

kolom simetris, pusat plastisnya akan sama dengan pusat geometrisnya. Maka, persamaan momennya sebagai berikut:

$$M_n = P_n \cdot e \quad (2.90)$$

$$M_n = 0,85f'_c \cdot a \cdot b \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - A_s f'_s \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (2.91)$$

Tulangan tekan (A'_s) atau tulangan tarik (A_s) akan mencapai kekuatan lelehnya f_y , bergantung pada besarnya eksentrisitas (e). Tegangan f'_s pada baja dapat mencapai f_y apabila keruntuhannya berupa hancurnya beton. Jika keruntuhan berupa lelehnya tulangan baja, besaran f_s harus disubstitusikan dengan f_y . Apabila f'_s atau $f_s \leq f_y$, maka yang disubstitusikan adalah tegangan aktualnya, dihitung menggunakan persamaan yang diperoleh dari segitiga sebangun dengan distribusi regangan di seluruh tinggi penampang kolom. Persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$f'_s = E_s \frac{0,003(d-c)}{c} \leq f_y \quad (2.92)$$

$$f_s = E_s \frac{0,003(c-d')}{c} \leq f_y \quad (2.93)$$

2.4.3.4 Kuat Geser Kolom

Penentuan nilai kuat geser atau V_c sama dengan kuat geser pada balok yaitu ditentukan berdasarkan nilai terkecil dari persamaan berikut:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{3,5A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (2.94)$$

Apabila $M_u - N_u (4h-d)/8$ maka persamaan yang digunakan yaitu (2.94):

$$V_c = \left[0,16 \lambda \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{4h-d}{8}} \right] b_w \times d \quad (2.95)$$

$$V_c = 0,29 \lambda \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \times \sqrt{1 + \frac{0,29 N_u}{A_g}} \quad (2.96)$$

Keterangan:

N_u, V_u, M_u = gaya aksial, gaya geser, dan momen terfaktor

$$d = 0,8h$$

Kebutuhan tulangan geser pada kolom dilihat pada persamaan

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.97)$$

pada balok.

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.97)$$

2.4.3.5 Syarat Perencanaan Kolom SRPMK

Perencanaan kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRMPK) sudah disyaratkan seluruhnya pada SNI 2847:2019 Pasal 18.7, dengan pembahasan yang berbeda tiap poinnya yaitu dimensi, tulangan, dan kuat geser.

1. Syarat Dimensi dan Kekuatan Kolom SRMPK
 - a. Dimensi penampang terkecil, diukur melalui pusat geometri pada garis lurus, tidak kurang dari 300 mm.
 - b. Rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.
 - c. Kondisi kekuatan nominal kolom harus lebih besar 1,2 kali dari kekuatan nominal balok. Maka persamaan kekuatan lentur dimensi kolom dapat dilihat sebagai berikut:

$$\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb} \quad (2.98)$$

Keterangan:

$\sum M_{nc}$ = jumlah kekuatan lentur nominal kolom-kolom yang merangka kedalam *joint*, yang dievaluasi di muka-muka *joint*

$\sum M_{nb}$ = jumlah kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke dalam *joint*, yang dievaluasi di muka-muka *joint*

2. Syarat Tulangan Longitudinal Kolom SRPMK

- a. Luas tulangan longitudinal, $0,01A_g \leq A_{st} \leq 0,06A_g$.
- b. Kolom dengan sengkang bundar, jumlah batang tulangan longitudinal minimum harus 6.
- c. Sambungan mekanis harus memenuhi Pasal 18.2.7 dan sambungan las Pasal 18.2.8.
- d. Sambungan lewatan diizinkan hanya dalam daerah tengah tinggi kolom dan harus didesain sebagai sambungan tarik dan jarak tulangan transversal terpasang sama dengan sengkang yang terpasang pada daerah $2h$ atau l_o (sendi plastis) yang memenuhi Pasal 18.7.5.2 dan Pasal 18.7.5.3.

3. Syarat Tulangan Transversal Kolom SRPMK

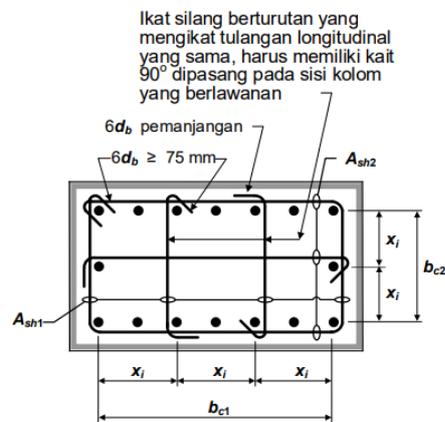
Tulangan transversal harus dipasang sepanjang l_o dari masing-masing muka *joint*. Yang mana panjang l_o tidak boleh kurang terhadap nilai terbesar dari tiga ketentuan sebagai berikut:

- a. Tinggi kolom pada muka *joint* atau pada penampang yang dimungkinkan terjadi pelelehan lentur.
- b. $1/6$ tinggi bersih kolom.
- c. 450 mm.

Untuk tulangan transversal harus sesuai dengan ketentuan SNI 2847:2019 berikut:

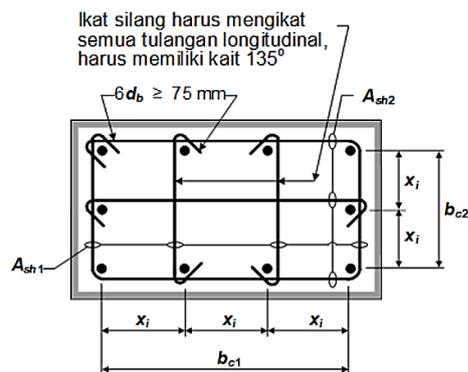
- a. Tulangan transversal harus terdiri dari spiral tunggal atau spiral saling tumpang (*overlap*), sengkang pengekan bundar, atau sengkang pengekan persegi, dengan atau tanpa ikat silang.
- b. Setiap tekukan ujung sengkang pengekan persegi dan ikat silang harus mengait batang tulangan longitudinal terluar.
- c. Ikat silang dengan ukuran batang tulangan yang sama atau yang lebih kecil dari diameter sengkang pengekan diizinkan sesuai batasan pada Pasal 25.7.2.2.
- d. Tulangan harus diatur sedemikian sehingga spasi h_x antara tulangan-tulangan longitudinal di sepanjang perimeter penampang kolom atau kaki-kaki sengkang pengekan tidak boleh melebihi 350 mm.

- e. Kondisi I seperti pada Gambar 2.14, jika $P_u \leq 0.3A_g f'_c$ dan $f'_c \leq 70$ MPa, maka harus ada ≥ 1 kait per 2 tulangan longitudinal dan $h_x \leq 350$ mm.



Gambar 2.14 Contoh Penulangan Transversal pada Kolom Kondisi I

- f. Serta Kondisi II, jika $P_u > 0.3 A_g f'_c$ dan $f'_c > 70$ MPa, maka tiap tulangan longitudinal harus diberi kait dan $h_x \leq 200$ mm. Contoh dari bentuk penulangan sengkang pada kolom dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Contoh Penulangan Transversal pada Kolom Kondisi II

Selain itu pada SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.3, spasi tulangan transversal pada daerah l_o tidak melebihi nilai terkecil dari tiga ketentuan berikut kecuali bila jumlah tulangan transversal yang lebih besar disyaratkan oleh Pasal 18.7.4.3 atau Pasal 18.7.6.

- 1/4 dimensi terkecil penampang kolom.
- Enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil ($6d_b$).
- S_o ditentukan dengan persamaan berikut:

$$100 \text{ mm} \leq \left(S_o = 100 + \frac{350 - h}{3} \right) < 150 \text{ mm} \quad (2.99)$$

Untuk jumlah tulangan transversal harus sesuai yang diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.4 atau dapat dilihat pada Tabel 2.20.

Tabel 2.20 Jumlah Tulangan Transversal untuk Kolom SRPMK

Tulangan Transversal	Kondisi	Persamaan yang Berlaku	
Ash/s.bc Untuk sengkang pengekang persegi	$P_u \leq 0,3 \cdot A_g f'_c$ dan $f'_c \leq 70 \text{ MPa}$	Terbesar dari (a) dan (b)	$0,3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \cdot \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (a) $0,09 \cdot \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (b)
	$P_u > 0,3 \cdot A_g f'_c$ atau $f'_c > 70 \text{ MPa}$	Terbesar dari (a), (b), dan (c)	$0,2 \cdot k_f \cdot k_n \cdot \frac{P_u}{f_{yt} \cdot A_{ch}}$ (c)
ρ_s Untuk spiral ataupun sengkang pengekang lingkaran	$P_u \leq 0,3 \cdot A_g f'_c$ dan $f'_c \leq 70 \text{ MPa}$	Terbesar dari (d) dan (e)	$0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \cdot \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (d) $0,12 \cdot \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (e)
	$P_u > 0,3 \cdot A_g f'_c$ atau $f'_c > 70 \text{ MPa}$	Terbesar dari (d), (e), dan (f)	$0,35 \cdot k_f \cdot \frac{P_u}{f_{yt} \cdot A_{ch}}$ (f)

Faktor kekuatan beton (k_f) dan faktor keefektifan pengekangan (k_n) dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$k_f = \frac{f'_c}{175} + 0,6 \geq 1,0 \quad (2.100)$$

$$k_n = \frac{n_1}{n_1 - 2} \quad (2.101)$$

n_1 adalah jumlah batang atau bundel tulangan longitudinal di sekeliling inti kolom dengan sengkang persegi yang ditumpu secara lateral oleh sudut dari sengkang pengekang atau kait seismik.

4. Syarat Kekuatan Geser Kolom SRPMK

- a. Gaya geser desain (V_e) dihitung dari tinjauan gaya maksimum yang dapat terjadi di muka *joint* pada setiap ujung kolom. Gaya-gaya *joint* ini harus ditentukan menggunakan kekuatan lentur maksimum yang mungkin terjadi (M_{pr}) disetiap ujung kolom yang terkait dengan beban aksial terfaktor (P_u) pada kolom. Gaya geser desain dari kolom berdasarkan kapasitas kolom ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$V_e = \frac{(M_{pr3} + M_{pr4})}{l_u} \quad (2.102)$$

Keterangan:

V_e = gaya geser desain

$M_{pr3,4}$ = momen maksimum kolom pada bagian ujung atas/bawah kolom berdasarkan tulangan kolom yang terpasang. Dalam perhitungan $M_{pr3,4}$ mutu baja tulangan longitudinal (f_y) dan faktor reduksi (ϕ) harus disesuaikan dengan ketentuan masing-masing jenis struktur

l_u = tinggi bersih dari kolom.

- b. Gaya geser kolom (V_e) yang diperoleh dari persamaan sebelumnya tidak perlu melebihi nilai geser yang dihitung dari kekuatan *joint* berdasarkan M_{pr} balok yang merangka ke *joint* (V_e -dari balok), yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_e = \frac{\sum M_{nb}}{l_n} \quad (2.103)$$

Keterangan:

V_e = gaya geser desain

$\sum M_{nb}$ = jumlah momen kapasitas balok pengekang

l_n = bentang bersih dari balok

Selain itu, pada SNI 2847:2019 Pasal 18.7.6.2, tulangan transversal sepanjang l_o , harus didesain untuk menahan geser dengan mengasumsikan $V_c = 0$ bila hal berikut ini terjadi:

- a. Gaya geser akibat gempa berdasarkan Pasal 18.7.6.1 setidaknya setengah kekuatan geser perlu maksimum di sepanjang l_o .
- b. Gaya tekan aksial terfaktor P_u termasuk pengaruh gempa $< A_g \cdot f'c / 20$.

2.4.4 Hubungan Balok-Kolom (HBK)

Sama dengan penjelasan lainnya HBK sudah diatur pada SNI 2847:2019. Penjelasannya diketahui bahwa HBK hanya disyaratkan untuk SRPMM dan SRPMK saja yang mengacu pada Pasal 15 dan 18.8. HBK merupakan suatu titik pertemuan antara elemen kolom dan balok. Pada SRPMK mutu tulangan akan ditingkatkan 25% dari mutu awal, menjadi $1,25f_y$.

Adanya perhitungan HBK ini untuk menentukan jumlah penulangan transversal (senggang) di dalam sambungan yang harus memadai untuk menahan geser dan menjamin daktilitas.

2.4.4.1 Kapasitas Balok pada HBK

Nilai kapasitas balok merupakan nilai kumulatif yang digunakan pada perhitungan gaya geser pada HBK. Pada suatu balok akan terjadi momen yang bergoyang ke arah x dan y yang merupakan bentuk nilai kumulatif kapasitas momen balok. Kapasitas momen balok pengeang ($\sum M_{nb}$) kemudian di proyeksikan sebagai momen ujung pada kolom 1 maupun 2 pada HBK yang ditinjau. Sehingga, persamaan momen menjadi sebagai berikut:

$$M_u = \frac{\sum M_{nb}}{2} \quad (2.104)$$

Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan gaya geser (V_u) pada ujung kolom tersebut seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.105), arah x maupun arah y. Maka, nilai gaya geser ultimate pada tengah HBK dapat ditentukan dengan cara memperhitungkan interaksi gaya-gaya yang bekerja pada HBK.

$$V_u = \frac{M_u}{l_u} \quad (2.105)$$

Keterangan:

M_u = dianggap sebagai momen pada ujung kolom

V_u = nilai geser yang berasal dari balok pengekang

l_u = tinggi bersih dari kolom

2.4.4.2 Interaksi Gaya pada HBK

Gaya geser HBK ini terjadi ketika terjadi retak pada hubungan kedua elemen dalam gerakan geser. Agar tidak terjadi kehancuran ketika terdapat gerak dinamis maka ditambah tulangan geser (A_{sh}). Gaya geser HBK dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V_u = T_A + T_B - V_{ukolom} \quad (2.106)$$

Nilai gaya geser (V_u) yang dihitung dan harus memenuhi syarat dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.8.4.1, dimana nilai V_u harus diambil tidak lebih dari ketentuan yang ada pada Tabel 2.21.

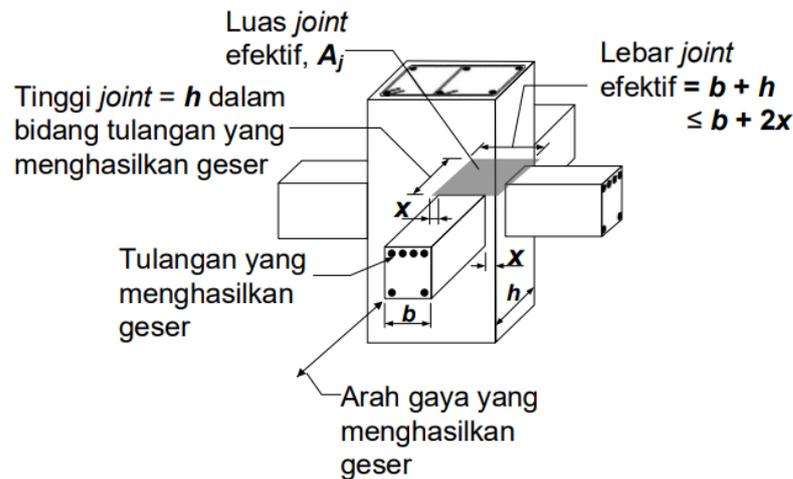
Tabel 2.21 Kekuatan Geser Iizin

Konfigurasi HBK	V_{u-izin}
Untuk <i>joint</i> yang terkekang oleh balok-balok pada keempat sisinya	$V_{izin} = 1,7\sqrt{f'c} \times A_j$
Untuk <i>joint</i> yang terkekang oleh balok-balok pada tiga sisinya atau dua sisi berlawanan	$V_{izin} = 1,2\sqrt{f'c} \times A_j$
Untuk kasus-kasus lainnya	$V_{izin} = 1,0\sqrt{f'c} \times A_j$

Untuk luasan efektif HBK (A_j), sudah diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.8.4.3 harus dihitung dari tinggi kali lebar efektif HBK seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16 dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Tinggi HBK harus sebesar lebar kolom (h).
2. Lebar efektif HBK harus selebar kolom, kecuali bila ada balok yang merangka ke dalam kolom yang lebih lebar.

3. Lebar efektif HBK tidak boleh melebihi nilai terkecil dari lebar balok ditambah tinggi HBK dan dua kali jarak tegak lurus yang lebih kecil dari sumbu longitudinal balok ke sisi kolom.



Gambar 2.16 Luasan Efektif HBK dengan Empat Balok Pengekang

2.4.4.3 Syarat HBK Struktur SRPMK

1. Tegangan pada tulangan longitudinal balok di muka HBK diasumsikan sebesar $1,25f_y$.
2. Tegangan longitudinal yang dihentikan di dalam kolom harus diteruskan ke muka terjauh dari inti kolom terkekang dan harus disalurkan dalam kondisi tarik.
3. Berdasarkan Pasal 18.8.2.3, dimensi kolom yang searah dengan tulangan balok tidak boleh kurang dari $20.db$ (db = diameter tulangan longitudinal terbesar balok).
4. Tinggi HBK h tidak boleh kurang dari setengah tinggi balok-balok pengekang HBK dan menyebabkan geser pada HBK sebagai bagian dari sistem pemikul gaya seismik.
5. Tulangan transversal HBK harus memenuhi Pasal 18.7.5.2, Pasal 18.7.5.3, dan Pasal 18.7.5.7, kecuali seperti yang diizinkan pada Pasal 18.8.3.2.
6. Berdasarkan Pasal 18.7.5.4, apabila balok terkekang di keempat sisinya dan bila lebar dari setiap balok tiga perempat lebar kolom maka jumlah tulangan yang diperlukan diizinkan untuk direduksi setengahnya. Kemudian spasi yang

disyaratkan pada Pasal 18.7.5.3 diizinkan untuk ditingkatkan hingga 150 mm dalam ketinggian balok (h) terendah yang merangka pada HBK tersebut.

7. Kekuatan geser (V_n) HBK harus sesuai dengan Pasal 18.8.4.1.
8. Kolom dikatakan terkekang oleh balok apabila lebar balok yang merangka tiga perempat dari lebar efektif HBK.
9. Perpanjangan balok yang melewati muka HBK setidaknya sama dengan tinggi balok (h) boleh dianggap memberikan kekangan pada muka HBK.
10. Luasan efektif HBK (A_j) harus sesuai dengan Pasal 18.8.4.3.

2.5 Metode Elemen Hingga (MEH)

Metode Elemen Hingga (MEH) berdasarkan sudut pandang *engineers* adalah metode untuk menyelesaikan masalah rekayasa seperti analisis tegangan, aliran fluida, dan elektro (Fish & Belytschko, 2007)puter (Fish & Belytschko, 2007). Jutaan insinyur dan ilmuwan di seluruh dunia menggunakan MEH untuk memprediksi perilaku struktural, mekanik, termal, listrik, dan kimia untuk analisis desain dan kinerja. Popularitas penggunaan buku, jurnal, dan tesis yang membahas metode elemen hingga sampai tahun 2024 melalui Google Scholar dapat diketahui mencapai lebih dari 4 juta hasil dan bertambah setiap tahunnya. Maka dari itu, penggunaan metode elemen hingga ini dapat digunakan sebagai bentuk penyelesaian masalah dalam bentuk simulasi melalui *software*.

Langkah dasar dan pertama Metode Elemen Hingga (MEH) adalah memodelkan struktur sebagai rakitan (*assemblage*) dari bagian-bagian yang lebih kecil dan berbentuk sederhana. Bagian yang lebih kecil ini disebut elemen hingga. Titik yang menghubungkan antara satu elemen dengan elemen-elemen lainnya disebut titik nodal (*node*) (Tjong, 2021).

2.5.1 Matriks

Metode perhitungan dengan menggunakan matrik diperlukan dalam memformulasikan rumus kekakuan elemen dengan sederhana dan begitu juga matrik penting digunakan di dalam pemrograman komputer untuk menyelesaikan perhitungan numeris. Berdasarkan (Choiron et al., 2024) matriks adalah suatu kumpulan bilangan yang diatur di dalam kolom dan baris sehingga membentuk segi empat siku-siku.

Bilangan di dalam segi empat tersebut sering disebut elemen atau unsur. Dimensi matrik dinyatakan dengan ordo yang menyatakan banyaknya baris (arah horizontal) dan banyaknya kolom (arah vertikal) dalam suatu matrik. Jadi suatu matrik yang mempunyai baris berjumlah m dan kolom berjumlah n maka matrik tersebut berordo $m \times n$. Sebagai contoh adalah matrik gaya F , yang akan juga digunakan untuk mendeskripsikan suatu komponen gaya dalam elemen, terdiri dari gaya-gaya pada masing-masing node atau simpul ($F_{1x}, F_{1y}, F_{1z}, F_{2x}, F_{2y}, F_{2z}, \dots, F_{nx}, F_{ny}, F_{nz}$). Komponen-komponen gaya tersebut beraksi pada node (1,2,3,....., n) yang juga mengakibatkan perpindahan (*displacement*) pada masing-masing node ($d_{1x}, d_{1y}, d_{1z}, d_{2x}, d_{2y}, d_{2z}, \dots, d_{nx}, d_{ny}, d_{nz}$).

$$[F] = \bar{F} = \begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{1z} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ F_{2z} \\ \dots \\ \dots \\ F_{nx} \\ F_{ny} \\ F_{nz} \end{bmatrix} \quad [d] = \bar{d} = \begin{bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ d_{1z} \\ d_{2x} \\ d_{2y} \\ d_{2z} \\ \dots \\ \dots \\ d_{nx} \\ d_{ny} \\ d_{nz} \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

Tanda kurung $[]$ digunakan untuk menandakan matrik kolom. Sehingga seluruh komponen gaya dan perpindahan di dalam kolom matrik dapat disimpulkan, masing-masing, sebagai $[F]$ dan $[d]$, sedangkan simbol F dan d dengan garis diatasnya menyatakan matrik secara umum artinya dapat berupa matrik kolom atau matrik segi empat. Penggunaan matrik segi empat siku-siku dapat dinyatakan dengan simbol $\{ \}$. Sebagai contoh matrik untuk menyatakan koefisien kekakuan elemen dan global, masing-masing disimbolkan sebagai $\{k\}$ dan $\{K\}$ dinyatakan sebagai berikut:

$$\{k\} = \bar{k} = \begin{Bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ k_{m1} & k_{m2} & \dots & k_{mn} \end{Bmatrix} \quad (2.108)$$

$$\{K\} = \bar{K} = \begin{Bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ K_{m1} & K_{m2} & \dots & K_{mn} \end{Bmatrix} \quad (2.109)$$

Maka persamaan kekakuan global menjadi:

$$\bar{F} = \bar{K}\bar{d} \quad (2.110)$$

$$[F] = \begin{Bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ K_{m1} & K_{m2} & \dots & K_{mn} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{1X} \\ d_{1Y} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_{nz} \end{Bmatrix} \quad (2.111)$$

Rumus 1-7 menunjukkan rumus kekakuan global dengan jumlah derajat kebebasan sebanyak n . Dalam hal ini nilai d tidak diketahui, dan menentukan harga d sebagai kondisi batas. Contoh kondisi batas, misalnya pada suatu node memodelkan suatu jenis tumpuan jepit, maka perpindahan pada node tersebut ke arah sumbu x , y , z mempunyai harga nol. Sehingga kita bisa menentukan harga d pada node tersebut. Untuk mencari harga d yang tidak diketahui kita bisa menggunakan beberapa metode eliminasi seperti metode Gauss, atau iterasi Gauss-Seidel. Untuk menyelesaikan jumlah node yang banyak atau dimensi matrik yang besar maka penyelesaian menggunakan program komputer adalah efektif.

2.5.2 Istilah Umum dalam Metode Elemen Hingga

Beberapa istilah yang digunakan dalam analisis struktur dengan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

1. Beban

Beban adalah sebuah gaya yang bekerja dan menimbulkan tegangan serta regangan pada suatu struktur. Beban nodal adalah beban terpusat, sedangkan beban nodal ekuivalen adalah beban terpusat atau beban merata yang terjadi pada bidang. Pada beban terdapat kondisi batas yang perlu diterapkan seperti reaksi gaya yang dipusatkan atau direncanakan merata hal ini berpengaruh pada gaya dalam dan perpindahan struktur.

2. Nodal Struktur

Gaya nodal struktur berperan dalam menjaga keseimbangan struktur bebas jika perletakan dilepas, hal ini dikarenakan hasil penggabungan reaksi perletakan sehingga menimbulkan gaya momen torsi, momen lentur, gaya geser dan aksial. Sedangkan, Nodal struktur adalah titik antar pertemuan elemen sehingga terbentuk sebuah struktur yang akan didefinisikan bentuk relasi persamaan kekakuan struktur.

Setiap elemen yang memiliki tumpuan yang disebut perletakan dibagi menjadi beberapa bentuk yaitu:

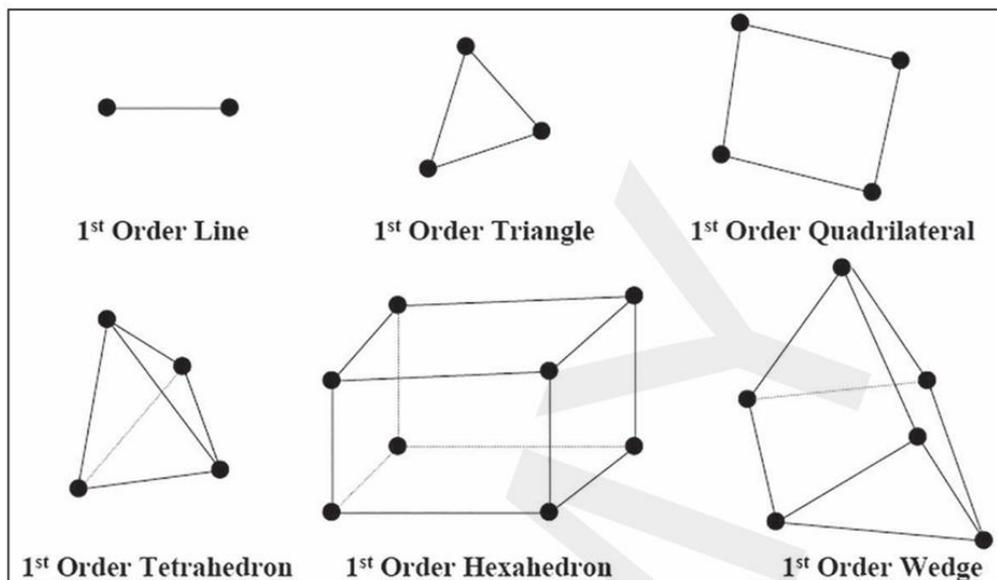
Tumpuan Sendi : tumpuan sendi atau engsel merupakan tumpuan yang hanya mampu menahan gaya vertikal dan horizontal sehingga memungkinkan terjadinya rotasi tetapi membatasi pergerakan translasi.

Tumpuan Jepit : jenis tumpuan yang kaku serta mampu menahan gaya vertikal, horizontal dan momen. Sehingga, tumpuan ini mampu menahan dan meneruskan gaya reaksi ke segala arah. Tumpuan ini sering digunakan pada analisis perencanaan bangunan gedung bertingkat.

Tumpuan Roll : tumpuan yang didesain untuk menahan gaya vertikal saja dan memungkinkan pergerakan horizontal pada arah tertentu.

3. Nodal Elemen

Gaya nodal elemen muncul untuk menjaga keseimbangan elemen apabila lepas dari struktur. Gaya elemen ini ada sebelum menggabungkan gaya nodal struktur menjadi rangkaian elemen struktur. Sedangkan, Nodal elemen merupakan sebuah titik yang akan didefinisikan sebagai bentuk persamaan kekakuan elemen. Untuk menjelaskan pendekatan dasar dari MEH, dapat dilihat pada Gambar 2.17 sebuah pelat dengan lubang dapat dipilih atau dibuat otomatis bentuk elemen segitiga atau segiempat. Pada dasarnya MEH adalah membagi *body* menjadi elemen hingga yang terhubung oleh simpul sehingga disebut *mesh* elemen hingga.



Gambar 2.17 Contoh Bentuk Elemen *Meshes* pada MEH (Tjong, 2021)

4. Titik Nodal

Terjadinya perpindahan derajat kebebasan nodal pada elemen akibat pembebanan merupakan pengertian dari peralihan nodal. Derajat kebebasan (*degree of freedom (DOF)*) adalah tingkatan derajat yang diperlukan untuk menyatakan posisi suatu sistem atau elemen pada setiap saat tertentu. Pada suatu dinamika setiap titik atau massa pada umumnya hanya diperhitungkan berpindah tempat dalam satu arah saja yaitu arah horizontal. Jadi derajat kebebasan ditentukan berdasarkan tumpuan atau perletakan yang dibuat. Dengan ketentuan nilai DOF jika sudah diberi tumpuan menjadi $3n$ (x , y , rotasi) dikali jumlah restrain. Sehingga diketahui tumpuan dapat dilihat pada :

Sendi – Sendi = 2 DOF

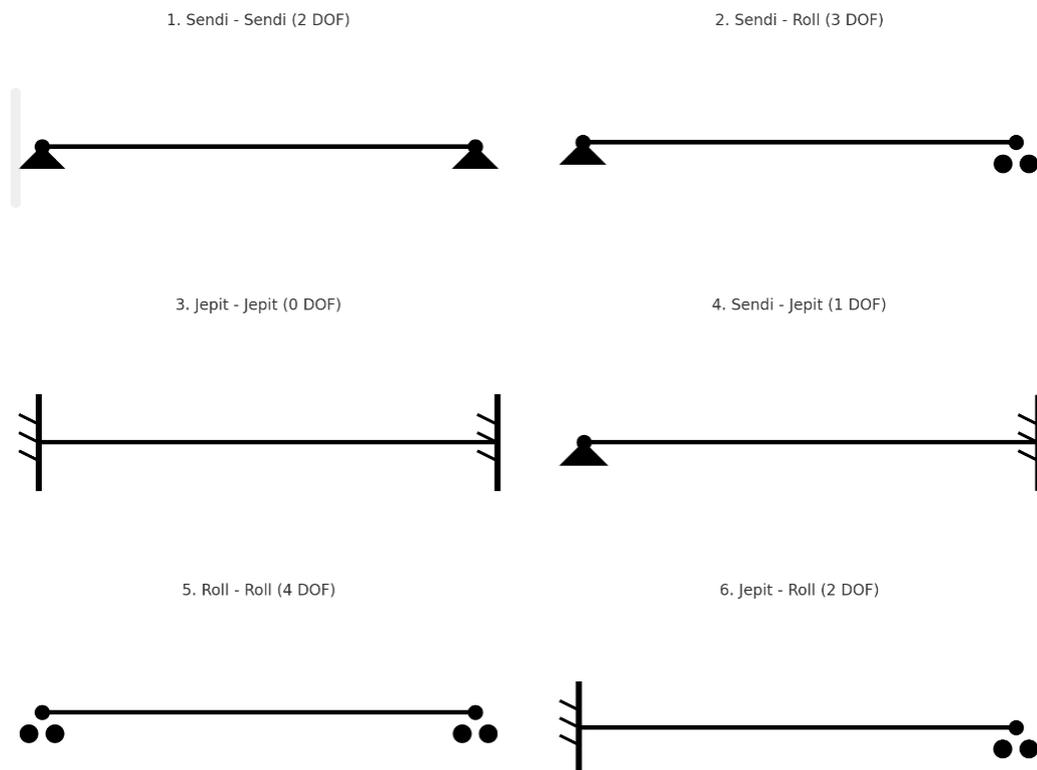
Jepit – Jepit = 3 DOF

Roll – Roll = 0 DOF

Sendi – Roll = 1 DOF

Sendi – Jepit = 4 DOF

Jepit – Roll = 2 DOF



Gambar 2.18 DOF pada Beberapa Tumpuan

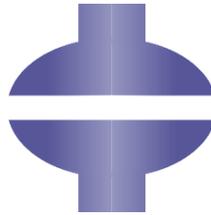
2.5.3 Kelebihan Penggunaan Metode Elemen Hingga

Beberapa kelebihan dalam penggunaan metode elemen hingga menurut Fazadina Tahun 2016 adalah sebagai berikut:

1. Benda dengan bentuk yang tidak teratur dapat dengan mudah dianalisis.
2. Tidak terdapat kesulitan dalam menganalisis beban pada suatu struktur.
3. Pemodelan dari suatu benda dengan komposisi materi yang berlainan dapat dilakukan karena tinjauan yang dilakukan secara individu untuk setiap elemen.
4. Dapat menangani berbagai macam syarat batas dalam jumlah yang tak terbatas.

5. Variasi dalam ukuran elemen memungkinkan untuk memperoleh detail analisis yang diinginkan.
6. Dapat memecahkan masalah-masalah dinamik.

2.5.4 Program Perangkat Lunak Abaqus



Gambar 2.19 Logo *Software* Abaqus

Finite Element Method (FEM) atau *Finite Element Analysis* (FEA) adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan masalah di bidang keteknikan, seperti analisis pada struktur (Barbero, 2023). Metode ini membantu para perancang untuk memastikan lokasi titik dan nilai tegangan tertinggi, sehingga desain tersebut dapat dipelajari dengan aman namun tetap optimal.

Abaqus adalah *software* komputer yang digunakan untuk menganalisis dan mengoptimalkan sistem mekanik yang kompleks, seperti sistem yang terdiri dari banyak komponen dan banyak faktor yang mempengaruhi kinerja (Hemamathi et al., 2022). Abaqus mempunyai berbagai macam produk melihat dari kategori penggunaannya, namun pada umumnya Abaqus CAE sering digunakan.



Gambar 2.20 Tampilan Pembuatan Model Perencanaan di *Software* Abaqus

Abaqus/CAE (Lingkungan Abaqus Lengkap) adalah bentuk grafis interaktif untuk Abaqus yang memungkinkan model dibuat dengan cepat dan mudah dengan memproduksi atau mengimpor geometri struktur yang akan dianalisis dan menguraikan geometri ke dalam wilayah yang dapat dijala. Sifat fisik dan material dapat ditetapkan ke geometri, bersama dengan beban dan kondisi batas. Setelah model selesai, Abaqus/CAE dapat mengirimkan, memantau, dan mengontrol pekerjaan analisis. Modul Visualisasi kemudian dapat digunakan untuk menafsirkan hasil. Sedangkan, Abaqus Standar adalah produk analisis tujuan umum yang dapat memecahkan masalah linier dan non linier yang melibatkan respons statis, dinamis, termal, listrik, dan elektromagnetik komponen (Abaqus Team, 2016). Dalam hal ini Abaqus digunakan sebagai perangkat analisis linier berupa analisis respons dinamik tanpa beban statik lateral, dan gaya dalam.

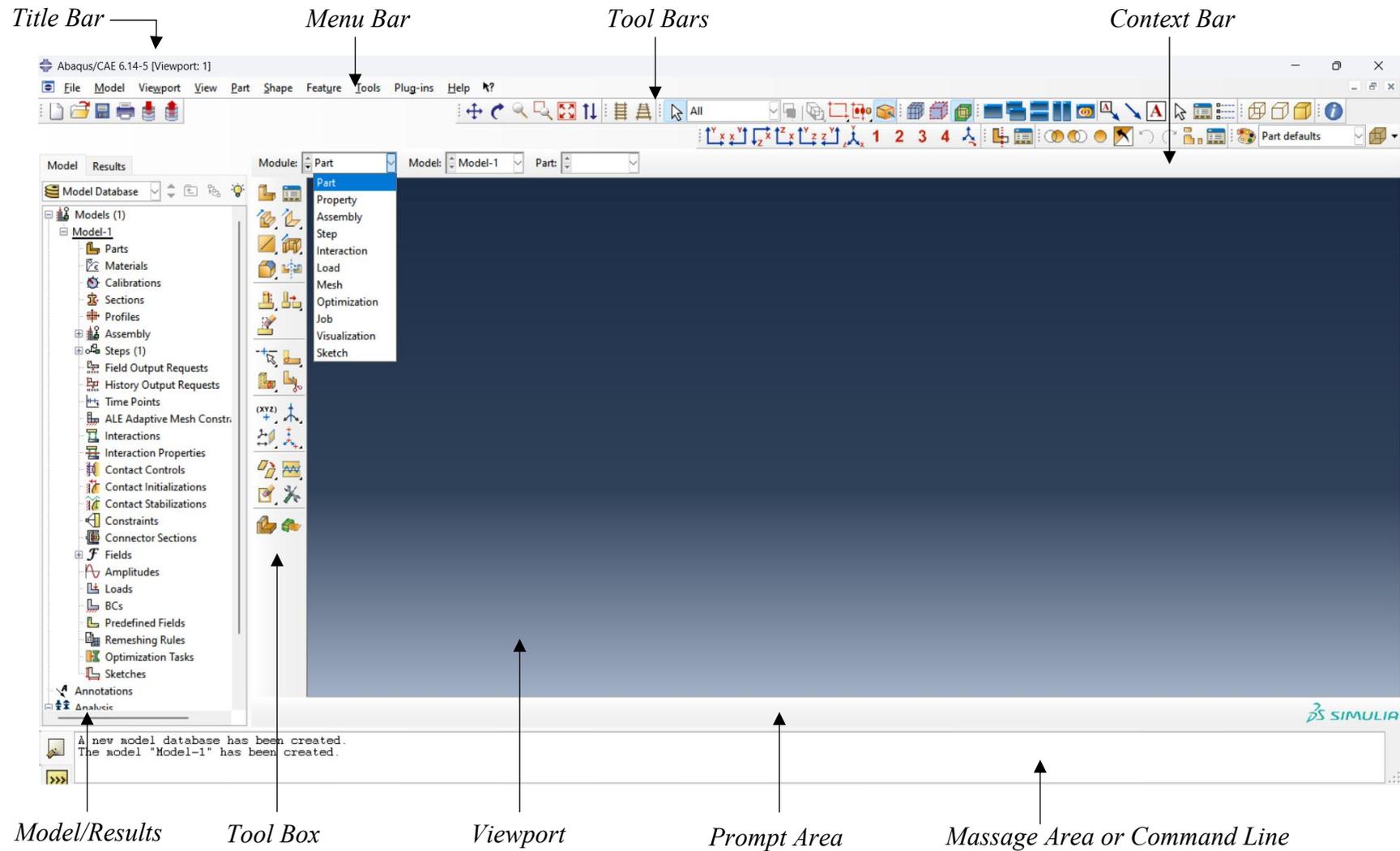
Abaqus memiliki beberapa keunggulan yang membuatnya sangat digunakan dalam hal ini industri teknik sipil dan pembangunan elemen struktur, yaitu:

1. Sudah menggunakan metode FEM yang membuat metode ini memungkinkan analisis yang lebih akurat dan efisien.
2. Kemampuan memodelkan berbagai jenis material, termasuk logam, polimer, komposit, beton, dan mekanika rekahan. Hal ini membuat hasil perancangan dapat mendekati keadaan di lapangan.
3. Abaqus menggunakan teknologi terintegrasi untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya komputer, memungkinkan analisis yang efisien dan cepat, meskipun pada model yang sangat besar.
4. Abaqus dapat terintegrasi dengan berbagai sistem CAD, yang memungkinkan analisis yang lebih efisien dalam proses rekayasa.

Penggunaan *Software* Abaqus ini menjadi salah satu gerakan pembaharuan sistem penelitian terdahulu yang dianalisis dengan konvensional maupun beberapa *software* struktur terdahulu lainnya. Komponen pada halaman utama Abaqus dapat dilihat pada dengan penjelasan sebagai berikut:

1. *Menu Bar*, berisi semua menu yang memberikan akses ke semua fungsi dalam produk pemodelan.

2. *Tools bars*, memberikan akses cepat yang tersedia pada menu.
3. *Context bar*, memungkinkan kita untuk berpindah antar modul serta mengambil bagian yang sudah ada ketika membuat geometri model.
4. *Model Tree*, menyediakan grafik sebagai *review* dari model objek dari masing-masing bagian, material, langkah, pembebanan yang sudah dibuat. Sedangkan, *Results Tree* memberikan grafik dari hasil data *base* dan spesifik data plot x-y.
5. *Toolbox area*, membuat akses cepat ke banyak fungsi modul yang tersedia.
6. *Canvas and drawing area* adalah tempat atau lokasi utama untuk area gambar.
7. *Viewport* adalah jendela di area gambar di mana Abaqus akan menampilkan model yang telah dibuat.
8. *Prompt area* berfungsi untuk menampilkan petunjuk atau panduan yang telah kita lakukan pada *software* Abaqus.
9. *Message Area or command line interface*, bagian ini Abaqus akan memunculkan informasi dan peringatan yang terjadi jika ada informasi atau kesalahan.



Gambar 2.21 Tools dan Tampilan Awal Software Abaqus

Software ini menggunakan metode numerik FEM/MEH untuk menyelesaikan masalah dalam menganalisis dan mengoptimalkan sistem mekanik yang kompleks. Maka untuk memudahkan pembagian dan proses perhitungannya diperlukan beberapa *tools* yang perlu diperhatikan dengan penjelasan sebagai berikut:

2.5.4.1 Part

Tool modul ini mendefinisikan bentuk geometri, baik 2D (seperti *shell* atau *wire*) maupun 3D (seperti *solid body*). Geometri ini dapat dibuat dari nol (sketsa baru) atau diimpor dari CAD eksternal. Bentuk yang dibuat bisa sederhana (balok, kolom, atau pelat) atau kompleks (mekanisme, pelat berlubang).

Perlu diketahui bahwa satu *Part* mewakili satu tipe geometri sebelum di-*assemble*. Setiap *Part* akan memiliki *features* seperti *extrude*, *revolve*, *sweep*, *cut*, dan lain-lain untuk memodifikasi bentuk. Dalam analisis struktur bangunan dengan beton bertulang maka dapat dibuat beberapa *Part* (beton dan tulangan)

2.5.4.2 Property

Tahap modul ini mendefinisikan *sifat material* dan *section assignment* untuk *Parts* yang sudah dibuat. Modul ini membahas aspek material fisik seperti modulus elastisitas (E), *Poisson's ratio*, massa jenis, perilaku plastis, viskoelastis, bahkan *failure criteria* (misal Mohr-Coulomb, Drucker-Prager untuk tanah).

Di dalam Property, setelah material dibuat, kita menetapkan *Section*, yaitu hubungan antara material dan bentuk elemen. Misalnya, pada *Part* pelat, kita bisa buat *Shell Section* tipis, atau pada *Part* beton, kita buat *Solid Section*. Tanpa properti ini, program Abaqus tidak dapat menyimulasikan bagaimana part akan berperilaku terhadap beban.

2.5.4.3 Assembly

Assembly adalah tempat menggabungkan *Part* menjadi satu sistem model lengkap. Di *Assembly* kita bisa mengatur posisi, orientasi, dan koneksi antar *Part*, termasuk membuat banyak *instance* dari satu *Part*.

Assembly bisa terdiri dari *dependent instances*/ikut geometri *Part* atau *independent instances*/bisa dimodifikasi sendiri. Proses *meshing* juga biasanya

dilakukan setelah *Assembly*, karena dalam sistem *multi-part* hubungan antar bagian seperti kontak atau sambungan *rigid* hanya didefinisikan setelah semua *Parts* yang berada di satu sistem *Assembly*.

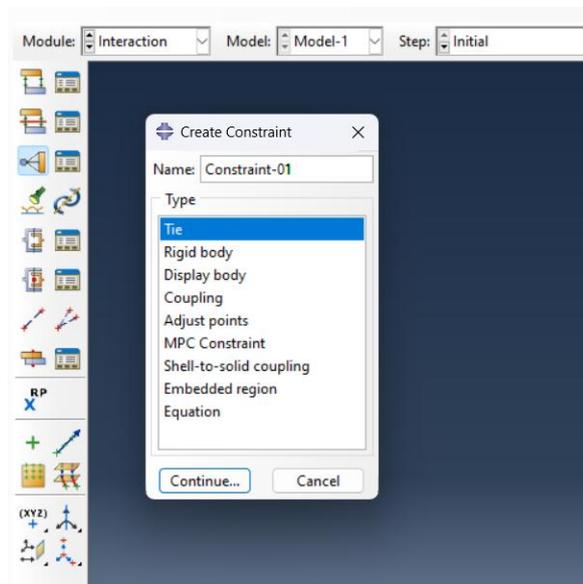
2.5.4.4 Step

Step adalah bagian untuk mendefinisikan progres analisis di Abaqus. Setiap *Step* mewakili periode waktu tertentu dalam analisis di mana kondisi beban, kontak, atau *constraint* dapat berubah.

Ada beberapa tipe *Step*: *Static*, *Dynamic* (impact/eksplosif), *Buckling*, *Heat Transfer*, dsb. Analisis dimulai dengan *Initial Step* yang otomatis dibuat dan bersifat konfigurasi awal (tanpa waktu jalan). Tahap *Step* inilah yang membagi analisis menjadi urutan simulasi fisik (*frame output*).

2.5.4.5 Constraint (Ikatan)

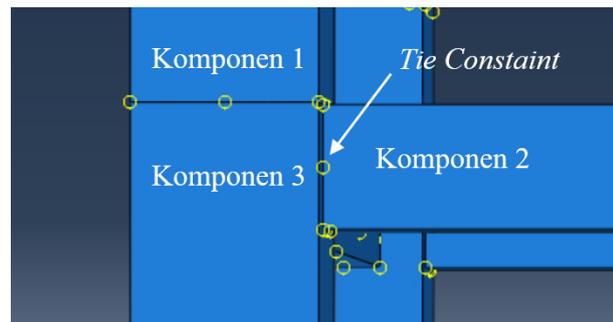
Interaction memiliki arti yang berbeda dari *Constraint*. *Interaction* merupakan hubungan permukaan yang bersentuhan antara dua elemen struktur atau lebih, sedangkan *constraint* adalah suatu pembatasan gerakan atau hubungan kaku antar elemen struktur dimana *node* dihubungkan satu sama lainnya.



Gambar 2.22 Jenis Ikatan Penyambung elemen Struktur (Abaqus)

Berdasarkan Gambar 2.22 jenis-jenis ikatan untuk menyambungkan sebuah elemen struktur yang terpisah ini terdapat 9 macam yaitu (Abaqus Team, 2016):

1. *Tie* digunakan untuk mengikat dua permukaan atau dua set elemen struktur seolah menyatu secara permanen dan tidak ada pergerakan relatif di semua arah (*translation & rotation*). Misalnya digunakan untuk mengikat tulangan dan balok beton bertulang, serta balok dan kolom seperti pada Gambar 2.23.



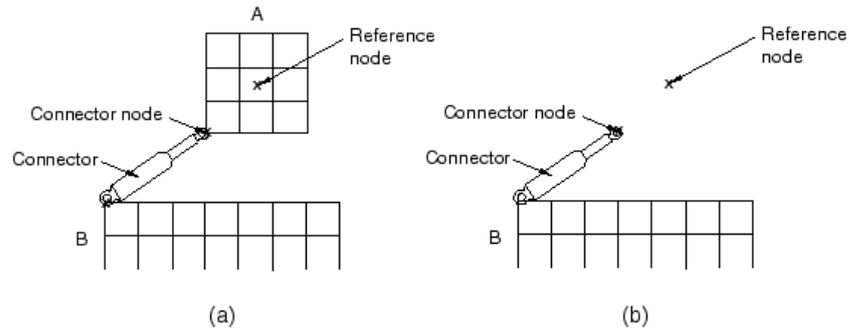
Gambar 2.23 *Tie Constraint* (Abaqus)

2. *Rigid Body* merupakan sekumpulan *node* agar berperilaku sebagai benda kaku sempurna (*rigid body*) atau jarak antar *node* tidak berubah selama gerak. Maka, harus ada satu titik referensi (*reference point*) sebagai kontrol gerakan. Untuk jenis *node* pada *rigid body* dibagi dua yaitu *pin node* dan *tie node*. *Pin node* hanya memiliki tingkat kebebasan translasi. Sedangkan *tie node* memiliki derajat kebebasan translasi dan rotasi yang terkait dengan benda kaku.



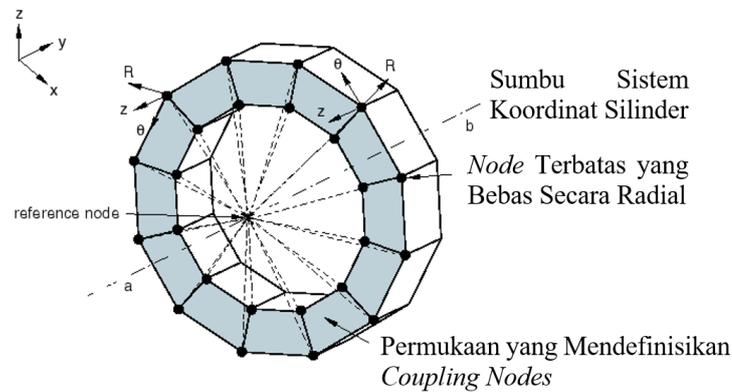
Gambar 2.24 *Rigid Body* dengan *Tie Node* dan *Pin Node Connections*

3. *Display Body* adalah gerakan elemen benda kaku diatur oleh gerakan simpul referensi terkait karena posisi relatif *node* dan elemen bagian tetap konstan selama simulasi. *Display Body* sangat berguna dalam masalah mekanisme atau dinamika *multibody* di mana bagian kaku berinteraksi satu sama lain melalui konektor.



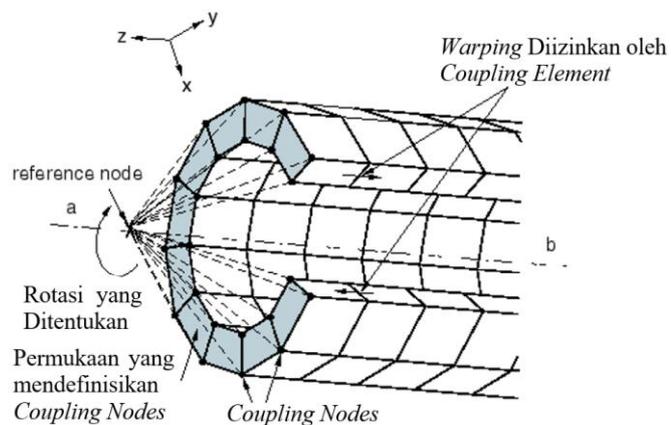
Gambar 2.25 Ilustrasi Model (a) dengan *Rigid Body* Dan *Display Body*, dan (b) Tanpa *Display Body*

4. *Coupling* adalah metode memperhitungkan dan menghubungkan pergerakan kelompok node ke satu pusat titik kendali.



Gambar 2.26 Ilustrasi Penggunaan *Kinematic Coupling*

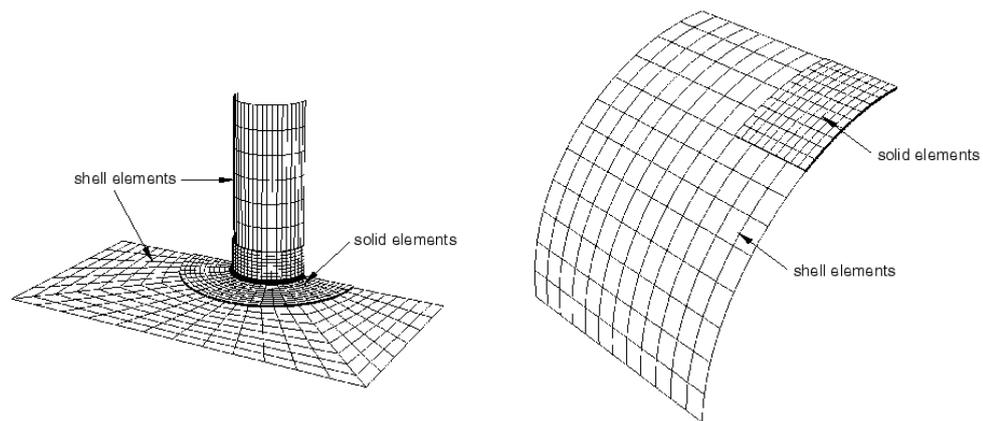
Berdasarkan Gambar 2.26 pemakaian *Constraint* berupa *Kinematic Coupling* ini untuk memusatkan gerakan yang memutar ke model tanpa membatasi gerak radial.



Gambar 2.27 Ilustrasi batasan *Distributing Coupling*

Berdasarkan Gambar 2.27 *Distributing Coupling* yang digunakan untuk menentukan kondisi perpindahan dan rotasi pada batas di mana gerakan relatif antar *node* pada batas yang diperlukan.

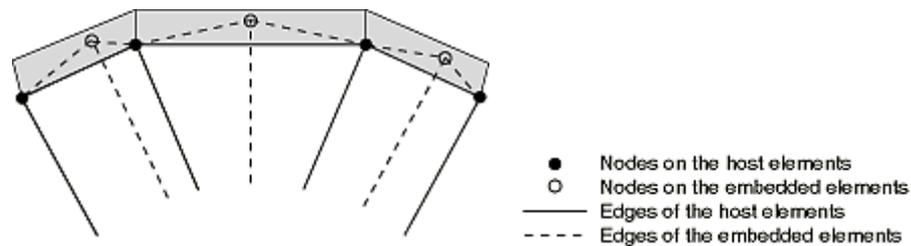
5. *Adjust Points* menggerakkan dua *node* agar berimpit satu sama lain sebelum proses simulasi dimulai dan tidak mengikat *node* secara dinamis seperti *tie constraint*. Dalam hal ini memiliki arti bahwa terdapat gap kecil ketika menyambungkan *mesh* yang hampir bertemu.
6. *Multi Point Constraint (MPC) Constraint* ini membuat hubungan matematis (linear) antar gerakan beberapa *node*. Pemilihan *Constraint* ini sangat kuat untuk kontrol matematis, tapi memperkenalkan kekakuan numerik yang tinggi. Secara garis besar terdapat 4 jenis MPS yang dimaksud yaitu:
 - a. *Beam* yang memiliki hubungan rotasi-translasi seperti batang elastik.
 - b. *Pin* yang memperbolehkan rotasi bebas seperti sambungan engsel.
 - c. *Rigid coupling* biasa.
 - d. *Tied* yang Mirip dengan *tie constraint* tetapi *node-based*.
7. *Shell to Solid Coupling* yaitu menghubungkan model *shell* (2D, pelat tipis) ke model *solid* (3D volume) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.28 secara konsisten di bidang tegangan dan deformasi. Pada tahap ini program Abaqus otomatis membuat hubungan *degree of freedom* (DOF) translasi dan rotasi.



Gambar 2.28 Contoh Tipikal *Shell to Solid Coupling*

8. *Embedded Region* yaitu metode menanamkan satu set elemen (biasanya tulangan atau elemen *truss*) ke dalam elemen lain (*solid host*). Terdapat dua

opsi pemilihan hubungan yaitu *linear embedding (rigid)* atau *slip allowed* (pergerakan terbatas).



Gambar 2.29 Toleransi Eksterior Untuk *Embedded Element*

9. *Equation* yaitu mendefinisikan persamaan matematis antara gerakan beberapa *node*, artinya harus mengetahui persamaan yang akan dimasukkan secara manual.

2.5.4.6 Load

Modul *Load* merupakan tempat untuk menerapkan gaya luar, tekanan, beban permukaan, *displacement* yang dipaksakan, torsi, bahkan gaya elemen itu sendiri seperti gravitasi. Setiap *Load* ditempatkan di *Step* tertentu dan memiliki magnitude, arah, serta lokasi penerapan. Beban harus didefinisikan dengan jelas dan teliti agar hasil mendekati kondisi lapangan. Pada *software* Abaqus ini mendukung berbagai skenario beban: statis, dinamis, impulsif, dsb.

2.5.4.7 Mesh

Istilah *Mesh* merupakan *tool* untuk membagikan suatu elemen struktur menjadi banyak bagian sehingga mendapatkan hasil yang baik pada distribusi momen, gaya geser, dan defleksi. Jumlah *Approximate Global Size* (AGS) pada *meshing* elemen struktur ini tidak memiliki aturan mendalam. Namun, Menurut SNI 2847:2019 pada implementasinya pembagian ini dilakukan untuk melihat hasil yang stabil dan terkonvergensi. Jika *mesh* terlalu kasar maka hasil tidak akurat dan sebaliknya jika *mesh* diterapkan secara halus maka waktu komputasi untuk menampilkan hasil simulasi akan membengkak. Sehingga, diperlukan akurasi dan efisiensi agar seimbang untuk menemukan tegangan puncak atau potensi retak pada setiap elemennya.

2.5.4.8 Job

Tahap Modul *Job* adalah tempat mengatur, mengelola, dan menjalankan simulasi. Dengan membuat *Job file*, dapat menentukan apakah simulasi akan dijalankan secara lokal, remote, atau *parallel processing*, dan memilih jenis analisis (*standard static, explicit dynamic, dll*).

Job Management juga memberikan status proses simulasi *running, aborted, terminated normally*, atau *error*. Pada tahap ini juga mengontrol *log file, message file, dat file*, dan *odb file*. Tanpa *Job*, model tidak akan diproses menjadi hasil analisis.

2.5.4.9 Visualization

Visualization adalah modul untuk melihat, menganalisis, dan mengevaluasi hasil simulasi dari *output database* (ODB) yang dihasilkan. *Visualization* ini mendukung animasi, *zoom area* tertentu, membuat *path* untuk plot hasil sepanjang garis, dan menghasilkan *report* numerik (*output report*). Evaluasi hasil di sini penting untuk memahami apakah model aman, perlu modifikasi, atau terjadi kegagalan.

2.5.4.10 Sketch

Sketch adalah modul *sub-tool* dalam *Part Module* yang memungkinkan pengguna menggambar profil 2D sebagai dasar pembuatan 3D *parts*. Kita bisa menggunakan berbagai *tool* seperti *lines, arcs, circles, polygons, splines* untuk menggambar.

Setelah sketsa selesai, kita bisa membuat *Part* 3D dengan operasi *extrude, revolve, sweep*, atau *loft*. *Sketching* ini penting untuk membuat geometri kompleks dari dasar, tanpa perlu bergantung pada *software* CAD eksternal. Penggunaan *dimensioning* dan *constraint* dalam *Sketch* juga memungkinkan geometri *parametric*.