

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Baja

Baja adalah campuran logam yang bahan penyusunnya terdiri dari besi serta dicampur dengan elemen lain seperti unsur karbon. Pada umumnya baja yang dipakai dalam struktur bangunan dapat digolongkan menjadi baja karbon, baja mutu rendah dan baja paduan. Pada ASTM A6/A6M telah diatur mengenai sifat – sifat mekanik baja, antara lain:

a. Baja Karbon

Baja karbon sendiri terbagi menjadi tiga kategori berdasarkan dari kandungan karbonnya, antara lain: baja karbon rendah ($C = 0,03\% - 0,35\%$), baja karbon menengah ($C = 0,35\% - 0,55\%$) dan baja karbon tinggi ($C = 0,55\% - 1,70\%$). Terdapat unsur lain pada unsur karbon yaitu mangan ($Mn = 0,25\% - 1,50\%$), silicon ($Si = 0,25\% - 0,30\%$), fosfor ($P = \leq 0,04\%$) dan sulfur ($S = 0,05\%$). Baja karbon memiliki tegangan leleh (f_y) antara 210 – 250 MPa.

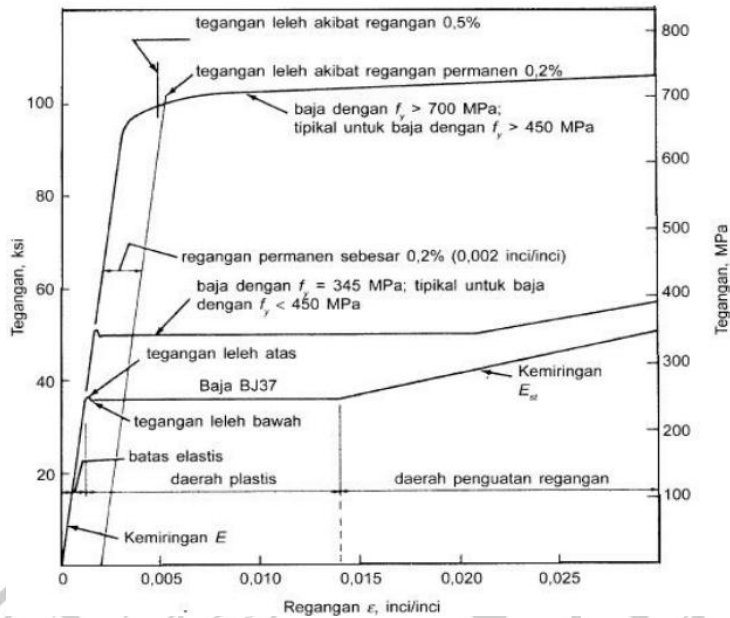
b. Baja paduan rendah dan mutu tinggi

Baja paduan rendah dan mutu tinggi (*high-strength low-alloy steel/ HSLA*) adalah baja dengan tegangan leleh (f_y) antara 290 – 550 MPa dan tegangan putus (f_u) antara 415 – 700 MPa. Penambahan unsur karbon dapat meningkatkan kekuatan baja seiring dengan meningkatnya persentase karbon. Di sisi lain, pada baja paduan rendah dan berkualitas tinggi, perbaikan sifat mekanisnya dapat dicapai melalui pembentukan mikrostruktur yang lebih halus dalam baja.

c. Baja paduan

Baja dengan paduan rendah atau *low alloy* dapat dipanaskan serta ditempa hingga mendapatkan tegangan leleh yang bernilai antara 550 – 760 MPa.

Untuk lebih jelas respon baja pada beban tarik, mulai dari elastisitas hingga leleh dan akhirnya strain hardening dapat dilihat pada Gambar diagram hubungan tegangan - regangan dibawah ini (Gambar 2.1).



Gambar 2. 1 Hubungan Tegangan – Regangan Tipikal

(Sumber : Suharto, S . 2017:10)

2.1.1. Sifat – Sifat Mekanik Baja

Baja yang dipergunakan sebagai bahan konstruksi pada bangunan memiliki beragam sifat fisik dan mekanik yang mampu berpengaruh pada kekuatan struktur bangunan. Dibawah ini terdapat sifat-sifat mekanis yang terdapat pada bahan konstruksi berupa baja :

a. Kekakuan (*stiffness*)

Kekakuan suatu material mencirikan kemampuannya untuk tetap tegang tanpa mengalami perubahan deformasi yang signifikan ketika dikenai tegangan tinggi. Ini adalah sifat material yang mampu menahan perubahan bentuk atau deformasi. Kekakuan material diukur dengan modulus elastisitas (E), dimana material dengan modulus elastisitas tinggi akan mengalami deformasi yang lebih kecil saat diberi beban. Sebagai contoh, material baja memiliki modulus elastisitas sebesar $E = 207.000\text{ MPa}$.

b. Kapabilitas (*Strenght*)

Sifat suatu bahan ditentukan oleh tegangan yang dapat menyebabkan regangan sebelum mencapai titik kegagalan (*failure*). Kemampuan ini dapat diukur melalui

batas proporsional, titik lentur, atau tegangan maksimum yang didefinisikan pada material.

c. Elastisitas

Elastisitas adalah karakteristik suatu material yang memungkinkannya untuk kembali ke bentuk awalnya setelah mengalami beban atau deformasi.

d. Daktilitas

Daktilitas adalah sifat suatu bahan yang dapat berdeformasi pada saat menerima beban tarik sebelum material tersebut benar – benar patah (rupture)

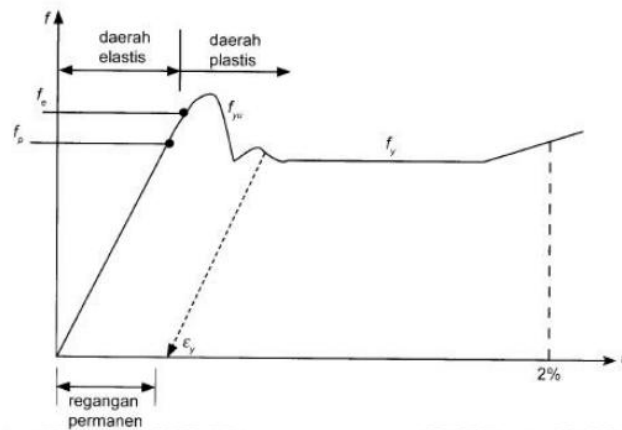
e. Kegetasan

Kegetasan adalah kondisi di mana suatu material, khususnya baja, tidak mengalami deformasi plastis sebelum mengalami kerusakan atau gagal. Dalam keadaan kegetasan, material dapat mengalami kerusakan tanpa menunjukkan tanda-tanda deformasi permanen sebelumnya.

f. Kelenturan

Kelenturan adalah sifat suatu material yang memungkinkannya menahan beban tinggi tanpa menunjukkan peningkatan tegangan pada batas elastisitasnya. Dengan kata lain, material yang lentur dapat menanggung beban yang cukup besar tanpa mengalami deformasi plastis yang signifikan atau tanpa melampaui batas elastisitasnya.

Berikut adalah diagram tegangan regangan pada baja dapat dilihat dibawah ini (Gambar 2.2).



Gambar 2. 2 Diagram Tegangan – Regangan

(Sumber : Kurnianingsih, O., dkk. 2024:70)

Titik – titik pada kurva di atas antara lain:

f_p : batas proporsional

f_c : batas elastis

f_{yu}, f_y : tegangan leleh atas dan bawah

ϵ_y : regangan pada saat terjadi efek penguatan regangan

Titik – titik penting ini membagi kurva tegangan – regangan menjadi beberapa daerah antara lain :

1. Daerah linier antara 0 dan titik yield (f_p) di daerah ini hukum yang berlaku Hukum Hooke, modulus elastisitas (E) adalah kemiringan dari bagian kurva yang lurus.
2. Daerah elastis di antara 0 dan f_c menunjukkan bahwa jika beban dihilangkan, material akan kembali ke bentuk asalnya, atau dengan kata lain, material tersebut masih memiliki sifat elastis.
3. Daerah plastis adalah daerah yang dibatasi antara regangan 2% sampai 1,2% – 1,5%, di bagian ini regangan mengalami kenaikan karena tegangan konstan sebesar f_y . Di daerah tersebut juga menunjukkan tingkat kekakuan material

baja. Pada jenis baja bermutu tinggi memiliki daerah plastis, tetapi di daerah ini tegangan juga sedang mengalami kenaikan.

4. Daerah penguatan regangan atau disebut *strain – hardening* pada \mathcal{E}_y . Pada tegangan yang lebih dari 15 hingga 20 kali regangan elastis maksimal, tegangan akan memiliki kenaikan namun pada kemiringan yang lebih kecil dibandingkan kemiringan di daerah elastis.

Pada SNI 03 – 1729 – 2020 terdapat sifat-sifat mekanik dari baja antara lain :

Modulus elastisitas (E) = 200.000 MPa

Modulus geser (G) = 80.000 MPa

Poisson ratio = 0,30

Koefisien muai panjang (*a*) = $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Sementara itu, berdasarkan tegangan leleh dan titik putusnya, kualitas material baja dibedakan menjadi 5 kelas mutu, antara lain:

Tabel 2. 1 Tabel Mutu Baja

Jenis Baja	Tegangan Putus Minimum f_u (MPa)	Tegangan Leleh Minimum f_y (MPa)	Regangan Minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	510	410	13

Sumber: Khakim, L. (2023:54)

2.2 Konsep Perencanaan

Perencanaan struktur baja mengacu pada penerapan prinsip-prinsip teknik untuk menjamin kekuatan, kekakuan, dan daktilitas sistem struktur terhadap beban

gravitasi dan beban gempa. Dalam sistem struktur tahan gempa, konsep perencanaan sangat menekankan pada perilaku inelastik terkendali dari elemen-elemen tertentu, serta kebutuhan zona perlindungan pada sambungan dan anggota utama. Selain itu, struktur harus memenuhi persyaratan kekuatan nominal, kekuatan yang tersedia, serta filosofi kapasitas desain yang memungkinkan deformasi plastis tanpa keruntuhan tiba-tiba. AISC 341 (2016: 10)

2.2.1. Bangunan Struktur Baja

Struktur baja merujuk pada konstruksi yang terdiri dari komponen baja struktural yang saling terhubung untuk mendukung beban dan memberikan kekakuan struktural penuh. Komponen utama dari struktur ini mencakup atap, pelat lantai, balok, dan kolom. Berkat kekuatan bahan yang tinggi, struktur baja membutuhkan jumlah bahan baku yang lebih sedikit dibandingkan dengan struktur lainnya, seperti struktur beton dan kayu.

Dalam konteks konstruksi modern, struktur baja dapat diterapkan pada berbagai jenis bangunan, termasuk bangunan industri berat dan gudang dengan tingkat ketahanan yang tinggi. Namun, untuk memastikan bahwa bangunan gedung memenuhi standar keamanan dan kenyamanan yang ditentukan, diperlukan perencanaan yang cermat dan sesuai.

2.2.2. Sistem Struktur Baja Tahan Gempa

Indonesia, yang terletak di jalur Cincin Api Pasifik dan pertemuan lempeng bumi, menghadapi risiko tinggi terhadap gempa bumi yang sering kali tidak dapat diprediksi waktu kejadiannya. Secara alami, struktur baja memiliki rasio kuat perbandingan berat-volume yang signifikan, menghasilkan bangunan yang relatif ringan. Hal ini menjadi aspek yang sangat penting dan perlu diperhatikan dalam perencanaan struktur bangunan yang tahan gempa.

Desain kapasitas merupakan landasan utama dalam perencanaan struktur tahan gempa. Dengan menggunakan metode ini, struktur dapat dirancang dengan optimal karena jika terjadi kondisi inelastis, hanya akan terjadi pada lokasi yang telah ditetapkan dan diprediksi sesuai perencanaan. Kejadian inelastis yang muncul juga harus dapat terkendali, berfungsi sebagai tempat dissipasi energi. Sementara itu, struktur lainnya harus tetap berada dalam keadaan elastis.

2.2.2.1. Sistem Portal

Sistem portal adalah sistem rangka pemikul beban lateral dan gravitasi yang terdiri dari balok dan kolom yang tersambung kaku sehingga dapat menahan momen akibat beban gempa atau angin. Berdasarkan tingkat daktilitas dan kinerjanya, sistem portal diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama menurut American Institute of Steel Construction AISC 341 (2016: 33)

a. *Special Moment Frames*

Special Moment Frames adalah rangka yang direncanakan dan dipersiapkan dapat bekerja secara inelastic penuh, melalui kelelahan balok pada rangka dan kelelahan pada ujung dasar kolom. Hal ini mengharuskan pada bagian yang terjadi sendi plastis yang dirancang secara khusus. Boleh juga dipakai sebagai perencanaan struktur gedung tinggi yang masih memungkinkan dengan system rangka. System rangka sendiri harus memenuhi standar strong column and weak beam (SCWB) yaitu keadaan di mana pada saat terjadi gempa pada bangunan yang mengalami kerusakan terlebih dahulu adalah balok sehingga memungkinkan penghuni bangunan untuk menyelamatkan diri. AISC 341 (2016:39)

b. *Intermediet Moment Frames*

Rangka berjenis ini mirip dengan Special Moment Frames yang mampu bekerja dengan inelastic namun terbatas. Cocok diaplikasikan pada struktur dengan kekuatan gempa menengah, seperti bangunan bertingkat rendah. AISC 341 (2016:36)

c. *Ordinary Moment Frames*

Jenis rangka Ordinary Moment Frames adalah jenis rangka yang didesain dan direncanakan sebagai rangka yang hanya bekerja secara elastis. Jenis rangka ini hanya bisa dipergunakan pada sistem struktur yang memiliki beban gravitasi besar, seperti bangunan yang tidak bertingkat dan bangunan yang mempunyai bentang luas. AISC 341 (2016:35)

2.2.2.2. Sistem Rangka Batang Silang

Sistem rangka batang silang (Braced Frame System) merupakan salah satu sistem struktur pemikul gaya lateral yang banyak digunakan pada struktur baja. Sistem ini memanfaatkan elemen-elemen diagonal (bracing) yang dipasang menyilang pada bidang portal untuk meningkatkan kekakuan lateral struktur terhadap beban gempa dan angin.

Berdasarkan Seismic Provisions for Structural Steel Buildings oleh AISC ANSI/AISC 341, (2016, 59), sistem rangka batang silang diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama sesuai dengan tingkat daktilitas dan ketahanan seismik yang dimilikinya:

a. *Special Concentrically Braced Frames* (SBCF)

Sistem rangka SBCF ini merupakan jenis rangka baja yang sering dipakai pada konstruksi bangunan tahan gempa khususnya di daerah – daerah yang memiliki gempa besar. Rangka pada system SCBF didesain dengan bracing yang bekerja melalui aksi tekuk tekan maupun leleh tarik pada batang diagonal apabila gempa besar terjadi. AISC 341 (2016: 62)

b. *Ordinary Concetrically Braced Frames* (OCBF)

OCBF dapat diartikan sebagai sistem rangka tak bergoyang, karena sistem rangka ini cenderung memiliki kekakuan dan mengandalkan gaya axial pada elemen-elemen struktural, mirip dengan sistem SCBF. Meskipun demikian, sistem ini lebih cocok untuk diterapkan pada struktur yang sangat dipengaruhi oleh beban rencana yang sudah pasti posisinya, seperti beban mati atau beban gravitasi. Kelebihan sistem ini terletak pada kemampuannya untuk berperilaku secara elastis saat menghadapi gempa besar, sehingga dapat bekerja dengan efektif dalam kondisi tersebut. AISC 341 (2016: 59)

c. *Eccentrically Braced Frames* (EBF)

Adanya leleh lentur dan/atau leleh geser lebih dimanfaatkan pada rangka jenis ini, dengan kata lain elemen-elemen akan bekerja secara inelastic. AISC 341 (2016: 78)

2.2.3. Sistem Struktur Komposit

Pengembangan sistem-sistem baru merupakan upaya untuk mengoptimalkan penggunaan material dalam menghadapi gaya-gaya yang bekerja, sehingga pemanfaatannya menjadi lebih efisien. Jika hanya mempertimbangkan kemampuan material dalam menanggung tegangan, penggunaan baja saja sebenarnya tidak akan menimbulkan masalah, karena baik tegangan tarik maupun tekan pada baja memiliki nilai kekuatan yang sebanding. Hal ini berbeda dengan beton, di mana kekuatan tarik beton sering diabaikan dalam perencanaannya, terutama setelah mengalami retak. Oleh karena itu, pada struktur beton, diperlukan penguatan dengan baja untuk menahan tegangan tarik. Dalam struktur beton bertulang, terjadi sinergi antara beton dan baja sebagai satu kesatuan, yang membuat cara kerjanya dapat disebut sebagai komposit. Secara umum, istilah "komposit" sering merujuk pada elemen struktur yang mekanismenya ditentukan oleh kerjasama antara beton yang bertulang dan profil baja. Elemen struktur tersebut dapat berupa balok maupun kolom.

Sistem balok komposit sangat sesuai untuk diterapkan pada balok yang mendukung lantai, baik itu digunakan dalam pembangunan jembatan maupun gedung. Pada sistem balok-lantai, kadang sulit untuk membedakan apakah struktur tersebut bersifat komposit atau non-komposit dari tampilan luar. Perbedaan utamanya terletak pada keberadaan shear stud atau shear connector yang tertanam dalam plat beton, yang mengakibatkan perilaku komposit antara kedua komponen struktur, yaitu profil baja dan lantai beton. Kedua komponen ini dapat bersatu sehingga mampu menahan beban sekitar 33 hingga 50% lebih besar dibandingkan dengan beban yang dapat ditanggung oleh balok baja tunggal tanpa adanya perilaku komposit (Setiawan, 2008). Struktur komposit memberikan keuntungan dalam meningkatkan capacity design dan kekakuan, menyediakan kemampuan struktural yang lebih baik, dan meningkatkan efisiensi. Beberapa keuntungan penggunaan struktur komposit meliputi:

1. Berat profil baja yang dipakai dapat direduksi
2. Dapat mengurangi tinggi profil baja yang digunakan
3. Kekakuan atau daltilitas pelat lantai dapat ditingkatkan

4. Panjang bentang dapat ditambah

2.3 Konsep Pembebanan

Untuk menjalankan fungsi struktur dengan baik, maka setiap struktur harus dapat menerima pengaruh dari luar yang harus diatasi. Selain itu, struktur tersebut juga akan menahan beratnya sendiri akibat pengaruh gaya gravitasi. Di bawah ini adalah Gambaran pembebanan yang ditahan konstruksi gedung bertingkat sesuai dengan peraturan terkait. AISC 341 (2016: 9)

2.3.1. Beban Vertikal

Pada beban vertikal, beban yang bekerja lebih dominan dikarenakan oleh gaya gravitasi. Berikut adalah beban-beban vertikal yang ditahan oleh struktur gedung.

a) Beban Hidup

Elemen struktur khususnya plat lantai, memiliki fungsi utama untuk menopang beban-beban hidup, yang diakibatkan oleh orang-orang atau benda-benda di dalamnya, contohnya perabotan, mesin, alat-alat, dan tumpukan-tumpukan barang yang ada. Beban hidup didefinisikan sebagai beban yang dapat hadir atau tidak hadir pada struktur untuk suatu periode waktu tertentu. Walaupun dapat berpindah-pindah, beban hidup tetap dianggap memberikan pengaruh secara perlahan pada struktur. Dalam perencanaan pembebanan pada beban hidup didasarkan pada peraturan pembebanan SNI 1727:2020

b) Beban Mati

Dalam struktur gedung, beban mati yang diperhitungkan mencakup beban dari elemen struktur gedung, baik yang mempunyai fungsi struktural ataupun non-struktural. Dalam perhitungan besarnya beban mati suatu elemen, dilakukan dengan meninjau berat satuan material yang didasarkan pada volume elemen. Berat satuan disebut juga dengan berat sendiri dari berbagai material konstruksi dan komponen bangunan gedung yang ditentukan berdasarkan peraturan yang berlaku, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.2 dari Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung tahun 1983.

Tabel 2. 2 Berat Sendiri Bahan Bangunan dan Komponen Gedung

BAHAN BANGUNAN	
Baja	7580 kg/m ³
Batu alam	2600 kg/m ³
Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1500 kg/m ³
Batu karang (berat tumpuk)	700 kg/m ³
Batu pecah	1450 kg/m ³
Besi tuang	7250 kg/m ³
Beton ⁽¹⁾	2200 kg/m ³
Beton bertulang ⁽²⁾	2400 kg/m ³
Kayu (Kelas I) ⁽³⁾	1000 kg/m ³
Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa ayak)	1650 kg/m ³
Pasangan bata merah	1700 kg/m ³
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200 kg/m ³
Pasangan batu cetak	2200 kg/m ³
Pasangan batu karang	1450 kg/m ³
Pasir (kering udara sampai lembab)	1600 kg/m ³
Pasir (jenuh air)	1800 kg/m ³
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850 kg/m ³
Tanah, lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1700 kg/m ³
Tanah, lempung, dan lanau (basah)	2000 kg/m ³
Timah hitam (timbel)	11400 kg/m ³
KOMPONEN GEDUNG	
Adukan, per cm tebal:	
- Dari semen	21 kg/m ²

Tabel 2. 2 Lanjutan

- Dari kapur, semen atau tras	17 kg/m ²
Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14 kg/m ²
Dinding pasangan bata merah:	
- Satu batu	450 kg/m ²
- Setengah batu	250 kg/m ²
Dinding pasangan batako:	
Berlubang:	
- Tebal dinding 20 cm (HB 20)	200 kg/m ²
- Tebal dinding 10 cm (HB 10)	120 kg/m ²
Tanpa lubang	
- Tebal dinding 15 cm	300 kg/m ²
- Tebal dinding 10 cm	200 kg/m ²
<hr/>	
Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya, tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari:	
- Semen asbes (eternity dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11 kg/m ²
- Kaca, dengan tebal 3 – 4 mm	10 kg/m ²
Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan untuk beban maksimum 200 kg/m ²	40 kg/m ²
Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s minimum 0,80 m	7 kg/m ²
Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	50 kg/m ²
Penutup atap sirap dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	40 kg/m ²
Penutup atap seng gelombang (BWG 24) tanpa gordeng	10 kg/m ²
Penutup lantai dari ubin semen Portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	24 kg/m ²
Semen asbes gelombang (tebal 5 mm)	11 kg/m ²

Sumber: LPMB (Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan), 1983:11

c) Beban Hujan

Menurut SNI 1727 (2020: 99), pada setiap bagian dari atap, atap diharapkan mampu menahan beban yang berasal dari seluruh air hujan yang terkumpul, terutama jika sistem drainase primer untuk bagian tersebut tertutup. Tambahan beban yang harus dipertimbangkan adalah beban merata yang diakibatkan oleh peningkatan tinggi air di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran rencananya. Perhitungan pembebanan air hujan pada atap gedung mengikuti ketentuan yang diatur dalam SNI 1727:2020.

$$RL = 0,0098 \cdot (d_s + d_h) \quad (2.1)$$

R = beban akibat air hujan di atap yang tidak melendut (kN/m^2)

d_s = ketinggian air hujan pada atap yang lendutannya tidak meningkat ke lubang air pada drainase sekunder

d_h = tambahan kedalaman air pada lubang masuk drainase sekunder di aliran air rencana (mm)

2.3.2. Beban Horizontal

Pada beban horizontal, beban yang bekerja lebih dominan disebabkan oleh pengaruh gaya lateral seperti beban gempa dan beban angin. Beban ini harus ditahan oleh sistem struktur penahan gaya lateral agar bangunan tetap stabil dan tidak mengalami keruntuhan lateral. Beban gempa direncanakan berdasarkan respons struktur terhadap percepatan tanah akibat gempa, sementara beban angin mempertimbangkan tekanan dan hisapan akibat aliran udara di sekitar bangunan. Berikut adalah beban-beban horizontal yang umum ditinjau pada struktur gedung:

a) Beban Angin

Menurut SNI 1727 (2020: 99) beberapa parameter yang digunakan dalam menentukan beban angin yang bekerja pada gedung antara lain:

a. Kecepatan Angin Dasar

Kecepatan angin ini adalah kecepatan angin rata-rata yang terjadi di setiap periode pada wilayah tertentu.

b. Kategori Eksposur (Kh)

Eksposur arah angin didasarkan pada kekasaran permukaan tanah antara lain ditentukan oleh vegetasi, topografi alam, serta fasilitas bangunan.

c. Koefisien Tekanan Internal

Pada Tabel 26.13-1 SNI 1727-2020, dapat diperoleh koefisien tekan internal berdasarkan klasifikasi desain gedung yang tertutup penuh.

Tabel 2. 3 Koefisien Tekanan Internal

Klasifikasi ketertutupan	Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan	Tekanan Internal	Koefisien tekanan internal, ($G_{C_{pi}}$)
Bangunan Tertutup	A_0 kurang dari terkecil $0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Sedang	-0,18
Bangunan tertutup Sebagian	$A_o > 1,1A_{oi}$ dan $A_o >$ terkecil dari $0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Tinggi	-0,55
Bangunan terbuka Sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan Klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau klasifikasi terbuka	Sedang	-0,18
Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80 %	Diabaikan	0,00

Sumber: SNI 1727 (2020: 122)

d. Koefisien Tekanan Dinding

Nilai koefisien tekan yang diakibatkan oleh gaya angin pada dinding gedung menurut Gambar 27.3-1 SNI 1727:2020 dapat dilihat pada Tabel 2.4 berikut:

Tabel 2. 4 Koefisien Tekanan Dinding

Permukaan	L/B	C_p	Digunakan dengan
Dinding di sisi angin datang	Seluruh nilai	0,8	q_z
	0 – 1	-0,5	q_h
Dinding sisi angin pergi	2	-0,3	q_h
	> 4	-0,2	q_h
	Seluruh nilai	-0,7	q_h

Sumber: SNI 1727 (2020: 131)

b) Beban Gempa

e. Kategori Resiko Struktur Bangunan

Kategori risiko pada struktur bangunan sangat tergantung pada jenis pemanfaatan atau fungsi dari bangunan tersebut. Informasi lebih lanjut dapat ditemukan dalam Tabel 3 dan Tabel 4 pada SNI 1726:2019 mengenai tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.5 di bawah ini:

Tabel 2. 5 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung Untuk Genpa

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

Tabel 2.5 Lanjutan

-
- Bioskop
 - Gedung pertemuan
 - Stadion
 - Fasilitas Kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat
 - Fasilitas penitipan anak
 - Bangunan untuk orang jompo

Gedung dan nongedung, 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:

- Pusat pembangkit listrik biasa
- Fasilitas penanganan air
- Fasilitas penanganan limbah
- Pusat telekomunikasi

Gedung dan nongedung 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.

Tabel 2.5 Lanjutan

Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:

- Bangunan-bangunan monumental
- Gedung sekolah dan fasilitas Pendidikan
- Rumah ibadah
- Rumah sakit dan fasilitas Kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat
- Fasilitas pemadam kebakaran, ambukans, 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 angka lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat
- Struktur tambahan (termasuk angka telekomunikasi, angka penyimpanan bahan bakar, angka pendingin, struktur stasiun listrik, angka air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat

Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.

Sumber: SNI 1726 (2019: 24)

Adapun faktor keutamaan gempa yang tercantum pada Tabel 2.6 sebagai berikut:

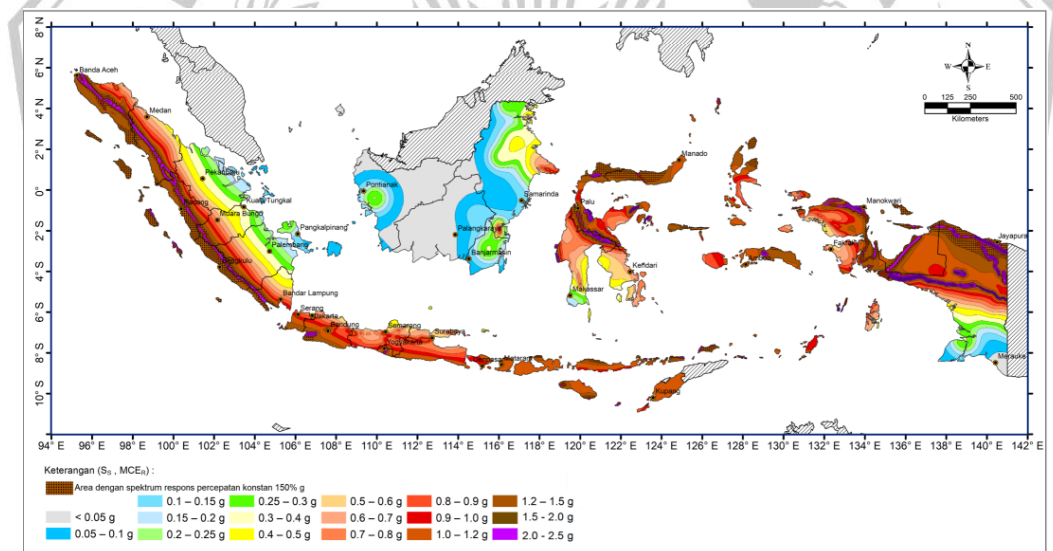
Tabel 2. 6 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber: SNI 1726 (2019: 25)

f. Parameter Spektrum Respons

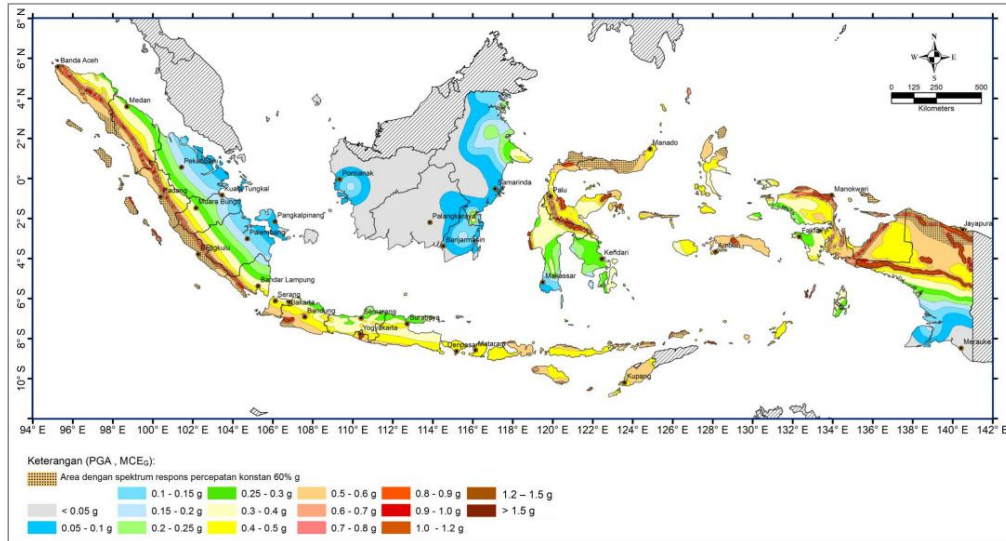
Peta gempa untuk SS percepatan pada periode pendek serta periode 1 detik (S1) dari Gambar 2.3 – SS dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 2. 3 Parameter gerak tanah S_s , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER)

(Sumber: SNI 1726 (2019: 233))

dan Gambar 2.4 – S1 dapat dilihat dibawah ini:



Gambar 2. 4 Parameter gerak tanah S₁, gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER)

(Sumber: SNI 1726 (2019: 234))



g. Kelas Situs

Berdasarkan sifat-sifat tanah pada suatu lokasi, tanah tersebut harus diklasifikasikan sebagai kelas situs SA, SB, SC, SD, SE, atau SF. Jika sifat-sifat tanah tidak dapat diidentifikasi dengan jelas sehingga tidak memungkinkan untuk menentukan kelas situs, maka kelas situs SE dapat digunakan, kecuali jika pemerintah/dinas yang berwenang memiliki data geoteknik yang memungkinkan untuk menentukan kelas situs SF. Klasifikasi situs ini diberikan berdasarkan Tabel 5 dalam SNI 1726 (2019: 29), sesuai dengan Tabel 2.7 yang meliputi:

Tabel 2. 7 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	vs (m/detik)	N atau Noh	su (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	<15	< 50

Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut :

1. ndeks plastisitas, $PI > 20$,
2. Kadar air, $w \geq 40\%$,
3. Kuat geser niralir $su < 25$ kPa

Tabel 2.7 Lanjutan

<p>SF (tanah khusus,yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)</p>	<p>Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, 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 $PI > 75$) <p>Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $su < 50$ kPa</p>
---	--

Sumber: SNI 1726 (2019: 29)

h. Kategori Desain Seismik

Struktur harus diklasifikasikan ke dalam suatu kategori desain seismik sesuai dengan ketentuan Pasal 6.5 dari SNI 1726 (2019: 37). Struktur yang memiliki risiko kategori I, II, atau III dan berada di lokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, S_1 , lebih besar dari atau sama dengan 0,75, harus diidentifikasi sebagai struktur dengan kategori desain seismik E. Sedangkan struktur yang termasuk dalam kategori risiko IV dan berada di lokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, S_1 , lebih besar dari atau sama dengan 0,75, harus diidentifikasi sebagai struktur dengan kategori desain seismik F. Untuk struktur lainnya, penentuan kategori desain seismik harus didasarkan pada kategori risiko dan parameter respons spektral percepatan desain, SDS dan SD1, dengan nilai yang sesuai dengan kriteria 0. Setiap bangunan dan struktur harus diidentifikasi ke dalam kategori desain seismik yang lebih tinggi, mengacu pada Tabel 2.8 - Tabel 2.11 dalam SNI 1726:2019, tanpa memperhatikan nilai periode fundamental getaran struktur, T .

Tabel 2. 8 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau 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
$0,5 \leq S_{DS}$	D	D

Sumber: SNI 1726 (2019: 37)

Tabel 2. 9 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik

Nilai S_{D1}	Kategori risiko	
	I atau 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
$0,2 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber: SNI 1726 (2019: 37)

Tabel 2. 10 Koefisien Situs F_a

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$

Tabel 2.10 Lanjutan

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
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)					

Sumber: SNI 1726 (2019: 34)

CATATAN:

SS = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

Tabel 2. 11 Koefisien Situs Fv

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode 1 detik, S ₁					
	S ₁ ≤ 0,1	S ₁ = 0,2	S ₁ = 0,3	S ₁ = 0,4	S ₁ = 0,5	S ₁ ≥ 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
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
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)					

Sumber: SNI 1726 (2019: 39)

CATATAN:

SS = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

Untuk mendapatkan parameter percepatan spectral desain pada periode pendek atau S_{DS} dan periode 1 detik atau S_{D1} berdasarkan ASCE dapat ditentukan dengan rumus berikut.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.2)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.3)$$

Dengan:

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \quad (2.4)$$

$$S_{M1} = F_v \cdot S_1 \quad (2.5)$$

Dengan:

S_s dan S_1 yang didapatkan dari peta gempa

F_a dan F_v yang didapatkan dari koefisien situs

i. Gaya Geser Dasar Akibat Gempa

Nilai gaya geser dasar dapat ditentukan dengan persamaan:

$$V = C_s \cdot W \quad (2.6)$$

Keterangan:

C_s = koefisien respon gempa

W = berat bangunan

j. Koefisien Respon Gempa

Koefisien respon gempa ditentukan dengan persamaan:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.7)$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter percepatan spektrum desain

R = factor modifikasi respon

I_e = factor keutamaan gempa

k. Distribusi Vertikal Gaya Gempa

Gaya lateral gempa F_x yang muncul di semua tingkat harus dihitung dari persamaan di bawah ini:

$$F_x = C_{vx} \cdot V \quad (2.8)$$

dengan

$$C_{vx} = \frac{W_x h_{kx}}{\sum W_i h_{ki}} \quad (2.9)$$

LKeterangan:

C_{vx} = factor distribusi vertical

V = gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur

w_i, w_x = bagian berat seismic efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikarenakan pada tingkat i atau x

h_i, h_x = tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)

k = eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai sebagai berikut:

untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, $k= 1$

untuk struktur dengan $T \leq 2,5$ detik, $k= 2$

untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, $k= 2$ atau ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

2.3.3. Kombinasi Pembebanan

Berdasarkan peraturan yang berlaku sebagaimana dijelaskan dalam Pasal 2.3.1 dari SNI 1727:2020 mengenai Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan

Gedung dan Struktur Lain, struktur harus direncanakan sedemikian rupa sehingga kekuatan desainnya setidaknya sama atau bahkan melebihi efek dari beban terfaktor dalam kombinasi pembebanan. Kombinasi pembebanan dalam studi ini ditentukan sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 1726-2019 pada Pasal 4.2.2.1 dan Pasal 4.2.2.3. Berikut adalah rincian mengenai hal tersebut:

a. Rincian kombinasi pembebanan berdasarkan SNI 1726-2019 pasal 4.2.2.1

$$- 1,4D$$

$$- 1,2D + 1,6L$$

b. Rincian kombinasi pembebanan berdasarkan SNI 1726-2019 pasal 4.2.2.3

$$- 1,2D + L + 1E_{hx} + 0,3E_{hy}$$

$$- 1,2D + L + 0,3E_{hx} + 1E_{hy}$$

$$- 0,9D - 1E_{hx} + 0,3E_{hy}$$

$$- 0,9D - 0,3E_{hx} + 1E_{hy}$$

dengan,

D = beban mati

L = beban hidup

E_{hx} = beban gempa pada arah X

E_{hy} = beban gempa pada arah Y

2.4 Perancangan Struktur

Perencanaan struktur adalah proses penentuan dimensi dan kapasitas elemen-elemen struktur bangunan agar mampu menahan beban-beban yang bekerja, baik beban gravitasi maupun lateral, sesuai dengan ketentuan keselamatan dan kinerja yang ditetapkan dalam peraturan bangunan. Dalam perencanaan struktur baja, metode yang umum digunakan adalah metode LRFD (Load and Resistance Factor Design), sebagaimana tercantum dalam peraturan ANSI/AISC 360(2016: 2).

2.4.1. Metode LRFD (Load Resistance Factor Design)

LRFD (Load and Resistance Factor Design) adalah metode perencanaan struktur baja yang menggunakan perbandingan antara kekuatan struktur, yang telah dikalikan dengan suatu faktor tahanan, dengan kombinasi beban terfaktor yang harus ditanggung oleh struktur tersebut. Dalam metode LRFD, perencanaan gedung mempertimbangkan faktor beban dan faktor ketahanan material. Pada dasarnya, metode LRFD mengharuskan tegangan yang terjadi pada elemen-elemen struktur menjadi lebih kecil dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan. Dengan kata lain, beban yang bekerja pada struktur harus lebih kecil daripada kapasitas penampang yang telah dibagi dengan faktor keamanan. Metode LRFD memberikan perbandingan yang khusus antara beban (Q) dan resistensi (Rn), seperti yang dijelaskan dalam persamaan berikut.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (2.10)$$

Dimana:

ϕ = factor tahanan berdasarkan struktur yang ditinjau

R_n = kekuatan nominal

γ_i = factor pembebanan

Q_i = beban nominal

Sedangkan untuk faktor tahanan struktur berdasarkan metode LRFD dalam SNI 1729:2019 adalah sebagai berikut:

Komponen struktur lentur $\phi = 0,9$

Komponen struktur yang menahan gaya tekan aksial $\phi = 0,85$

Komponen struktur gaya Tarik

Terhadap kuat Tarik leleh $\phi = 0,9$

Terhadap kuat Tarik retak $\phi = 0,75$

Komponen struktur gaya aksial dan lentur $\phi = 0,9$

Sambungan baut $\phi = 0,75$

Sambungan las

Las tumpul penetrasi penuh $\phi = 0,9$

Las sudut, las tumpul penetrasi Sebagian, las pengisi $\phi = 0,75$

2.4.2. Perancangan stabilitas

Perhitungan stabilitas struktur modern didasarkan pada asumsi bahwa perhitungan gaya-gaya pada batang diperoleh melalui analisis elastis orde-2. Analisis ini memastikan bahwa struktur tetap dalam keseimbangan setelah diberikan pembebanan, yang berarti setelah terjadi deformasi. Adanya imperfeksi pada elemen struktur, seperti ketidaklurusan batang yang mungkin timbul selama proses fabrikasi atau akibat toleransi pelaksanaan di lapangan, dapat mengakibatkan efek ketidakseimbangan yang bersifat destabilisasi.

Ketika imperfeksi bawaan menyebabkan efek destabilisasi dalam Metode Analisis Langsung (DAM), solusinya dapat diatasi melalui dua metode, yaitu (1) dengan melakukan pemodelan langsung pada geometri struktur yang sedang dianalisis, atau (2) dengan memberikan beban lateral ekuivalen. Pada pendekatan pertama, imperfeksi secara langsung dimasukkan ke dalam model analisis pada tahap pemodelan, sementara pada pendekatan kedua, beban lateral ekuivalen diterapkan pada elemen struktur untuk menggambarkan dampak imperfeksi terhadap keseimbangan dan stabilitas. Dengan demikian, kedua metode tersebut bertujuan untuk memperhitungkan dengan akurat efek imperfeksi pada DAM agar analisis respons struktur dapat dilakukan lebih tepat.

Dampak dari imperfeksi awal terhadap stabilitas struktur diperhitungkan melalui penggunaan beban imajinatif (notional load) sebagai representasi dari ketidaklurusan tersebut. Distribusi beban ini diterapkan sebagai beban lateral pada setiap tingkat struktur, di tambah dari beban lateral yang telah ada, dan dijumlahkan pada semua kombinasi pembebanan. Beban lateral ekuivalen ini harus diterapkan pada arah yang memberikan dampak destabilisasi terbesar. Perhitungan besarnya beban lateral ekuivalen dapat dilakukan dengan metode sebagai berikut:

$$N_i = 0,002 Y_i \quad (2.11)$$

Dimana:

N_i = beban lateral ekuivalen di level i

Y_i = beban gravitasi di level i hasil beban kombinasi LRFD

2.4.3. Dek Baja Gelombang

Evolusi struktur komposit dimulai dengan adopsi dek baja bergelombang yang memiliki fungsi ganda. Selain berperan sebagai bekisting ketika pelat beton dicor, dek baja ini juga bertindak sebagai tulangan positif bagi pelat beton. Penggunaan dek baja juga dapat dipertimbangkan sebagai dukungan dalam arah lateral untuk balok sebelum beton mencapai kekuatan penuh. Orientasi gelombang pada dek baja biasanya ditempatkan secara tegak lurus dengan arah balok penopangnya.

Persyaratan untuk dek baja bergelombang dan penghubung gesernya dalam konteks penggunaannya dalam komponen struktur komposit diatur dalam Pasal I3.2c SNI 1729:2020. Dalam pasal ini, terdapat isyarat yang mencakup berbagai ketentuan, seperti:

1. Tinggi rusuk nominal tidak melebihi 3 inci (75 mm), dan lebar rata-rata rusuk atau hauns beton, yang disimbolkan dengan w_r , harus setidaknya 2 inci (50 mm). Namun, perlu diingat bahwa dalam perhitungannya, lebar ini tidak boleh dianggap lebih besar daripada lebar bersih minimum di sekitar bagian atas dek baja.
2. Slab beton harus terhubung ke balok baja melalui angkur baja stad berkepala yang dilas, baik melalui dek itu sendiri atau secara langsung ke penampang melintang baja. Setelah diinstal, angkur baja stad berkepala harus memanjang tidak kurang dari 1½ inci (38 mm) di atas bagian paling atas dek baja. Selain itu, harus ada selimut beton yang tidak kurang dari ½ inci (13 mm) di atas bagian paling atas angkur stad berkepala sesuai dengan spesifikasi.
3. Tebal slab yang berada di atas dek baja tidak boleh lebih kecil dari 2 in. (50 mm)
4. Dek baja harus dihubungkan ke semua komponen struktur pendukung dengan jarak tidak melebihi 18 inci (460 mm). Penyambungan seperti itu harus dilakukan menggunakan angkur baja stad berkepala. Kombinasi angkur baja

stad berkepala dan las *arc spot (puddle)*, atau perangkat lain yang dijelaskan secara rinci dalam dokumen kontrak, juga dapat digunakan.

Dalam merancang pelat atap yang memanfaatkan floor deck, peran tulangan positif dapat digantikan oleh floor deck itu sendiri. Perhitungan momen kapasitas floor deck dapat menggunakan rumus berikut ini:

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.12)$$

dengan

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

Sedangkan perencanaan tulangan pada lapis atas, harus ditentukan rasio tulangan maksimum serta tulangan minimum terlebih dahulu.

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f_c'}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.13)$$

dengan

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

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

Sedangkan, harga A_s pakai berdasarkan Tabel A-5 (Dipohusodo, 1991: 458), didapatkan dari:

$$A_s \text{ perlu} = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.14)$$

dengan:

$$\rho = \frac{0,85 \cdot f_c' \cdot \beta_1}{f_y} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot R_n}{0,85 \cdot f_c'}} \right]$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2}$$

Tabel 2. 12 Luas penampang tulangan baja per meter panjang pelat

Diameter batang (mm)	Luas Penampang (mm ²)								
	Jarak Spasi p . k . p (mm)								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
6	565,5	282,7	188,5	141,4	113,1	94,2	80,8	70,7	62,8
8	1005,3	502,7	335,1	251,3	201,1	167,6	143,6	125,7	111,7
9	1272,3	636,2	424,1	318,1	254,5	212,1	181,8	159,0	141,4
10	1570,8	785,4	523,6	392,7	314,2	261,8	224,4	196,3	174,5
12	2261,9	1131,0	754,0	565,5	452,4	377,0	323,1	282,7	251,3
13	2654,6	1327,3	884,9	663,7	530,9	442,4	379,2	331,8	295,0
14	3078,8	1539,4	1026,3	769,7	615,8	513,1	439,8	384,8	342,1
16	4021,2	2010,6	1340,4	1005,3	804,2	670,2	574,5	502,7	446,8
18	5089,4	2544,7	1696,5	1272,3	1017,9	848,2	727,1	636,2	565,5
19	5670,6	2835,3	1890,2	1417,6	1134,1	945,1	810,1	708,8	630,1
20	6283,2	3141,6	2094,4	1570,8	1256,6	1047,2	897,6	785,4	698,1
22		3801,3	2534,2	1900,7	1520,5	1267,1	1086,1	950,3	844,7
25		4908,7	3272,5	2454,4	1963,5	1636,2	1402,5	1227,2	1090,8
28		6157,5	4105,0	3078,8	2463,0	2052,5	1759,3	1539,4	1368,3
23		6605,2	4403,5	3302,6	2642,1	2201,7	1887,2	1651,3	1467,8
32		8042,5	5361,7	4021,2	3217,0	2680,8	2297,9	2010,6	1787,2
36			6785,8	5089,4	4071,5	3392,9	2908,2	2544,7	2261,9
40			8377,6	6283,2	5026,5	4188,8	3590,4	3141,6	2792,5
50			13090,0	9817,5	7854,0	6545,0	5610,0	4908,7	4363,3

Sumber: Dipohusodo, Istimawan 1991: 458

Kontrol lendutan pelat dihitung pada pelat yang memiliki bentang dan nilai momen terbesar, namun sebelum dilakukan kontrol terhadap lendutan maka terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan tinggi minimum berdasarkan Tabel 9.5 (a) SNI 2847:2019.

Tabel 2. 13 Tebal minimum balok non-prategang atau pelat satu arah bila lendutan tidak dihitung

Tebal minimum, h				
Komponen struktur	Tertumpu sederhana	Satu ujung menerus	Kedua ujung menerus	Kantilever
Komponen struktur tidak menumpu atau tidak dihubungkan dengan partisi atau konstruksi lainnya yang mungkin rusak oleh lendutan yang besar				
Pelat massif satu arah	1/20	1/24	1/28	1/10
Balok atau pelat rusuk satu arah	1/16	1/18,5	1/21	1/8

Sumber: SNI 2847 (2019: 226)

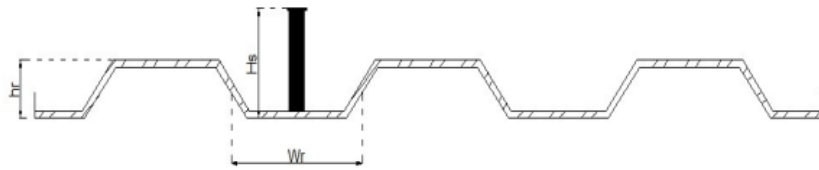
Nilai lendutan yang dihitung berdasarkan Tabel tersebut tidak boleh melebihi batasan sebagai berikut

Tabel 2. 14 Batasan Lendutan Balok Non-prategang atau Pelat Satu Arah

Jenis komponen struktur	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap datar yang tidak menumpu atau tidak disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat beban hidup L	$l/180^*$
Lantai yang tidak menumpu atau tidak disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat beban hidup L	$l/360$
Jenis komponen struktur	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Konstruksi atap atau lantai yang menumpu atau disatukan dengan komponen nonstruktural atau mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan komponen nonstruktural (jumlah dari lendutan jangka panjang, akibat semua beban tetap yang bekerja, dan lendutan seketika, akibat penambahan beban hidup)	$l/480$
Konstruksi atap atau lantai yang menumpu atau disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin tidak akan rusak oleh lendutan yang besar	hidup)	$l/240$

Sumber: SNI 2847 (2019: 227)

Penampang melintang dari sistem pelat lantai baja (metal deck) yang digunakan dalam struktur bangunan, khususnya dalam sistem komposit antara pelat baja bergelombang dan balok baja bisa dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Penampang melintang dek baja gelombang

(Sumber : Union Metal 2013, 2)

Apabila gelombang pada floordeck diposisikan secara tegak lurus terhadap balok penopangnya, maka kekuatan nominal penghubung geser berjenis paku harus direduksi atau dikurangi dengan factor yang disebut r_s nilai r_s dapat didapatkan dengan sebagai berikut:

$$r_s = \frac{0,85}{\sqrt{Nr}} \left(\frac{wr}{hr} \right) \left[\left(\frac{Hs}{hr} \right) - 1,0 \right] \leq 1,0 \quad (2.15)$$

keterangan:

r_s = factor reduksi

Nr = jumlah penghubung geser jenis paku pada setiap gelombang pada potongan melintang balok baja

Hs = tinggi penghubung geser jenis paku $\leq (hr + 75 \text{ mm})$

hr = tinggi nominal gelombang dek baja

wr = lebar efektif gelombang dek baja

Jika rasio w_r/hr kurang dari 1,5. Maka harus dikalikan dengan suatu faktor reduksi r_s sebagai berikut

$$r_s = \frac{0,85}{\sqrt{Nr}} \left(\frac{wr}{hr} \right) \left[\left(\frac{Hs}{hr} \right) - 1,0 \right] \leq 1,0 \quad (2.16)$$

Angkur yang digunakan berjenis angkur paku, dengan kombinasi las titik sebagai penghubung geser, atau dengan jenis lainnya.

Pada gelombang dek yang memiliki arah sejajar dengan balok baja penopang, perhitungan tebal beton di bawah tepi atas dek baja dapat diestimasi. Informasi ini berguna dalam menentukan karakteristik penampang komposit dan luas penampang pelat beton yang diperlukan untuk menghitung kapasitas gaya geser horizontal balok komposit.

Apabila tinggi nominal dek baja sama dengan atau lebih dari 40 mm maka nilai w_r atau lebar rata-rata dari gelombang yang ditumpu, harus memiliki nilai lebih dari $50 \text{ mm} + 4(ns - 1)d_s$. Sedangkan n_s adalah penampang yang memiliki jumlah yang sama dengan penghubung geser berjenis paku pada arah melintang,

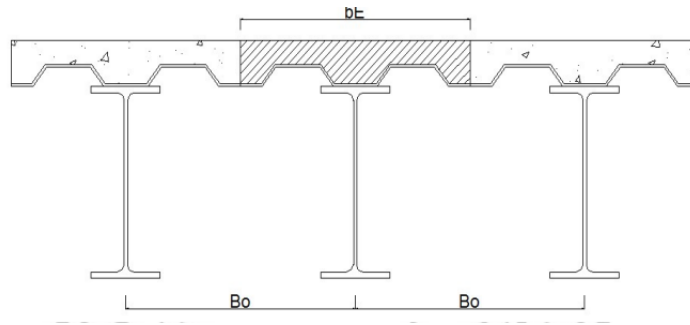
2.4.4. Balok Komposit

Dengan kemajuan metode pengelasan yang efektif dan pengembangan alat penghubung geser yang mampu menahan gaya geser horizontal, peningkatan dalam penyambungan antara pelat beton dan balok baja dapat dicapai. Hal ini mengakibatkan kedua material, yaitu beton dan baja, dapat bersatu sebagai suatu kesatuan yang disebut sebagai komponen struktur komposit.

Perilaku komposit akan terjadi apabila kemungkinan tercapainya pergeseran antar kedua material ini dapat dihindari. Beberapa jenis penghubung geser yang dapat digunakan antara lain berupa stud, baja dengan tulangan spiral, ataupun profil kanal kecil berdimensi pendek. Penghubung geser ini akan dihubungkan dengan sayap balok supaya fungsi komposit dapat dicapai secara penuh. ANSI/AISC 360 (2016: 102)

2.4.4.1. Lebar Efektif Balok Komposit

Konsep lebar efektif balok berguna dalam proses perencanaan, khususnya pada proses desain yang harus dilakukan pada salah satu elemen bangunan sesuai pada Gambar 2.6 yang memiliki distribusi tegangan yang tidak sama. Besarnya nilai dari lebar efektif balok pada suatu komponen struktur komposit bisa dihitung sebagai berikut:



Gambar 2. 6 Lebar Efektif Balok Komposit

sumber: SNI 1729 (2020: 35)

Dalam pasal I3.1a SNI 1729:2020, dinyatakan bahwa lebar efektif harus diambil berdasarkan dari jumlah lebar efektif pada tiap sisi sumbu balok dan tidak melebihi:

Satu per delapan dari bentang balok, ditentukan pusat-ke-pusat tumpuan

Setengah dari besarnya jarak ke sumbu pada balok yang saling berdekatan

Jarak dari tepi pelat

$$b_E \leq \frac{l}{4} \quad (2.17)$$

$$b_E = b_0 \quad (2.18)$$

2.4.4.2. Balok Komposit dengan Angkur Kanal Baja

Berdasarkan pasal I3.2a SNI 1729:2019, nilai kuat lentur nominal desain atau $\phi_b M_n$ komponen struktur komposit (pada momen positif), serta nilai izin pada kuat lentur positif, M_n harus direncanakan untuk kondisi batas leleh dengan rumus seperti dibawah ini:

$$\text{Untuk } \frac{h}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Nilai M_n ditentukan dari distribusi tegangan plastis di penampang komposit pada kondisi batas leleh atau momen plastis. $\phi_b = 0,90$.

$$\text{Untuk } \frac{h}{t_w} \geq 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Nilai M_n didapatkan berdasarkan superposisi tegangan elastis, pada keadaan batas leleh dengan mempertimbangkan efek penopangan (momen leleh). $\phi_b = 0,90$.

Kekuatan lentur negatif tersedia harus dihitung untuk penampang baja. Cara lainnya dengan nilai kuat lentur tersedia harus dihitung dari distribusi tegangan plastis di penampang komposit, pada kondisi batas leleh (momen plastis), $\phi_b = 0,90$
 $\Omega_b = 1,67$

Dengan batasan antara lain sebagai berikut:

1. Balok baja merupakan penampang kompak dan dilakukan pembreisan.
2. Angkur kanal baja atau disebut *steel headed stud* yang menyambungkan antara pelat dengan balok baja di daerah momen negatif.
3. Tulangan pada pelat yang dipasang parallel dengan balok baja, pada lebar efektif pelat, direncanakan dengan baik

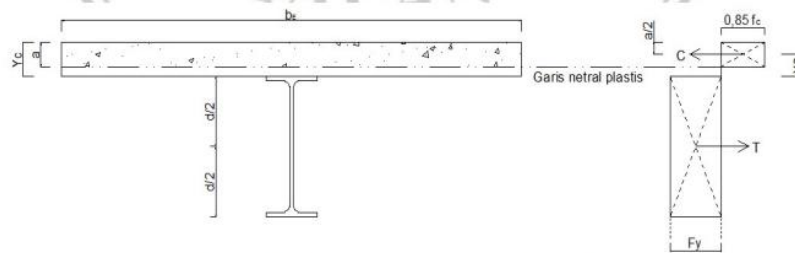
Perhitungan pada momen plastis balok komposit dengan cara mencari posisi sumbu netral plastis, yang bergantung dengan nilai proporsi C dan T. Besaran harga resultan gaya pada kondisi tekan dan tarik adalah sebagai berikut ini :

$$C = 0,85 \cdot f_c \cdot A_c \quad (2.19)$$

$$T = F_y \cdot A_s \quad (2.20)$$

Terdapat tiga keadaan distribusi tegangan plastis yang akan terjadi, yaitu:

Apabila nilai $T \leq C$ sumbu netral plastis ada di dalam pelat beton dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2. 7 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi a

sumber: SNI 1729 (2020: 37)

Nilai volume pelat beton cukup besar, sehingga pada saat terjadi momen lentur positif, kondisi profil baja mengalami leleh lebih dahulu. Pada tegangan tekan pelat beton (a), besarnya tinggi blok didapatkan dari perhitungan di bawah ini:

$$a = \frac{A_s \cdot F_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot E} \quad (2.21)$$

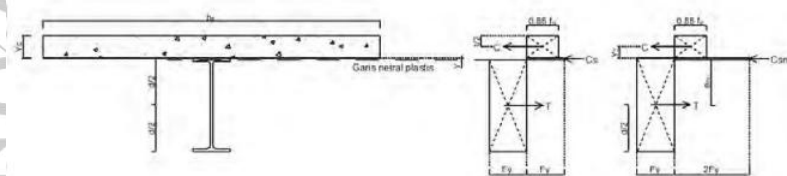
Diasumsikan sudah benar jika $a < t_c$ memakai dek baja, atau $a < t$ memakai pelat beton solid.

$$Y_c = h_r + t_{c2} \quad (2.22)$$

$$Y_2 = Y_c - \frac{1}{2} a \quad (2.23)$$

$$M_n = M_p = F_y \cdot A_s \cdot (Y_2 + \frac{1}{2} d) \quad (2.24)$$

Apabila nilai $T > C$ sumbu netral plastis ada pada baja untuk pelat sayap dapat dilihat pada Gambar 2.8



Gambar 2. 8 Distribusi tegangan plastis kondisi b

sumber: SNI 1729 (2020: 42)

Kadaan ini terjadi apabila luas pelat beton cenderung lebih kecil jika dibandingkan dengan kopel tarik pada profil baja. Maka dari itu pada saat terjadi momen positif, profil baja juga sedang mengalami desak. Ini terjadi apabila $t_f > y > 0$ yang direncanakan dengan rumus sebagai berikut:

$$T = F_y \cdot A_s \quad (2.25)$$

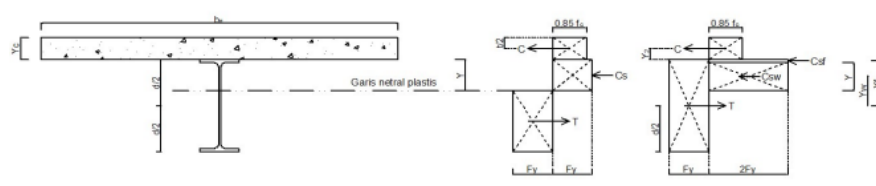
$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot b_E \cdot t_c \quad (2.26)$$

$$y = \frac{T-C}{b_f \cdot F_y} \leq t_f \quad (2.27)$$

$$C_{sm} = 2 F_y \cdot y \quad (2.28)$$

$$M_n = M_p = C (Y_2 + \frac{1}{2} d) + C_{sm} (d - y) \quad (2.29)$$

Jika $T > C$ sumbu netral plastis pada baja untuk pelat badan dapat dilihat pada Gambar 2.9



Gambar 2. 9 Distribusi tegangan plastis kondisi c

(sumber: SNI 1729 (2020: 65)

Keadaan ini terjadi apabila $y > t_f$ dan luas pelat beton cenderung lebih kecil jika dibandingkan dengan luas profil baja. Ini berakibat bagian pelat badan dari profil baja akan masih mengalami kondisi tekan. Keadaan ini bisa terjadi apabila $T - C - C_{sf} > 0$. Untuk nilai-nilainya dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$T = F_y \cdot A_s \quad (2.30)$$

$$C = 0,85 \cdot f_c' \cdot b_E \cdot t_c \quad (2.31)$$

$$C_{sf} = b_f \cdot t_f \cdot 2F_y \quad (2.32)$$

$$y = \frac{T - C - C_{sf}}{t_w \cdot F_y} \leq t_f \quad (2.33)$$

$$C_{sw} = 2 F_y \cdot y \cdot t_w \quad (2.34)$$

$$y_f = \frac{1}{2} \cdot (d - t_f) \quad (2.35)$$

$$y_w = \frac{1}{2} \cdot (d + y) - t_f \quad (2.36)$$

$$M_n = M_p = C (Y_2 + \frac{1}{2} d) + C_{sf} \cdot y_f + C_{sw} \cdot y_w \quad (2.37)$$

b. Penghubung Geser Angkur Baja

Sesuai dengan ketentuan SNI 1729:2015, disebutkan bahwa panjang angkur steel headed stud tidak boleh kurang dari empat kali diameter batang, diukur dari dasar angkur steel headed stud hingga bagian atas kepala batang setelah dipasang.

Nilai kuat geser nominal pada satu angkur steel headed stud yang dipasang pada pelat beton komposit dengan dek baja atau pelat solid harus dihitung sebagai berikut:

$$Q_n = 0,5 \cdot A_{sa} \cdot \sqrt{f_c' \cdot E_c} \leq R_g \cdot R_p \cdot A_{sa} \cdot F_u \quad (2.38)$$

Dengan:

A_{sa} = luasan penampang angkur tipe steel headed stud (mm^2)

E_c = modulus elastisitas beton

F_u = kuat tarik minimum yang diwajibkan dari suatu angkur steel headed stud (Mpa)

Tabel 2. 15 Nilai R_g dan R_p

Kondisi	R_g	R_p
Tanpa dek	1,0	1,0
Dek diorientasi parallel profil baja		
$\frac{W_r}{h_r} \geq 1,5$	1,0	0,75
$\frac{W_r}{h_r} \leq 1,5$	0,85**	0,75
Dek diorientasikan tegak lurus terhadap profil baja		
Jumlah dari angkur steel headed stud yang memiliki rusuk dek yang sama		
1	1,0	0,6 ⁺
2	0,85	0,6 ⁺
3 atau lebih	0,7	0,6 ⁺

h_r = tinggi rusuk nominal, in (mm)

W_r = lebar rata-rata dari rusuk atau voute beton (seperti dijelaskan dalam Pasal I3.2c), in (mm)

** untuk satuan angkur steel headed stud tunggal

+ nilai ini dapat ditingkatkan sampai -,75 bila $e_{\text{mid-ht}} \geq 2 \text{ in. (51 mm)}$

sumber: SNI 1729 (2020: 103)

Untuk pelat beton solid, kuat geser nominal satu angkur berjenis kanal canai panas dihitung sebagai berikut

$$Q_n = 0,3 \cdot (tf + 0,5tw) \cdot la \cdot \sqrt{f_c' \cdot E_c} \quad (2.39)$$

Dengan:

la = panjang angkur kanal (mm)

tf = ketebalan sayap angkur kanal (mm)

tw = ketebalan badan angkur kanal (mm)

Kekuatan angkur kanal harus diperoleh melalui pengelasan kanal ke sayap balok agar mampu menahan gaya yang setara dengan Q_n , dengan mempertimbangkan eksentrisitas pada konektor. Banyaknya angkur baja yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$N = \frac{V}{Q_n} \quad (2.40)$$

Dengan:

N = jumlah angkur konektor yang diperlukan

V = gaya geser horizontal

Q_n = kuat geser nominal satu buah angkur konektor

2.4.4.3. Balok Baja yang diberi selubung beton

Meskipun tanpa penggunaan angkur, balok baja yang diselubungi beton pada seluruh permukaannya bisa dianggap berfungsi secara komposit dengan beton. Asalkan memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

1. Ketebalan minimum selimut beton yang melapisi baja tidak boleh kurang dari 50 mm.

2. Posisi tepi atas pada balok baja tidak diperbolehkan kurang dari 40 mm pada bawah sisi atas pelat beton serta tidak kurang dari 50 mm pada atas sisi bawah pelat.
3. Selubung beton harus diperkuat dengan kawat jaring atau baja tulangan dengan jumlah yang memadai, sehingga dapat mencegah terlepasnya bagian selubung saat balok menanggung beban.

Kekuatan lentur dari balok baja yang diselimuti beton $\phi_b M_n$ harus direncanakan dengan memakai $\phi_b = 0,90$ dan nilai M_n ditentukan melalui superposisi tegangan – regangan elastis yang perhitungannya dipengaruhi oleh tumpuan sementara. Nilai kuat lentur rencana $\phi_b M_n$, juga dapat dihitung dengan memakai $\phi_b = 0,90$ dan M_n didasarkan pada distribusi tegangan plastis yang ada pada penampang baja saja.

2.4.5. Dasar Perencanaan Batang Tarik

Material baja memiliki kemampuan yang sama baik dalam menahan gaya tarik maupun tekan. Mutu bahan ini juga cenderung tinggi, sehingga dimensi struktur dapat dirancang menjadi lebih langsing. Dalam struktur yang bersifat seperti itu, penggunaan material baja lebih efisien untuk elemen yang mengalami tarik. Pada elemen yang mengalami tekan, kapasitasnya ditentukan oleh kondisi tekuk (buckling), sebuah masalah stabilitas yang dipengaruhi oleh konfigurasi geometri (struktur dan penampang), bukan hanya oleh sifat materialnya. ANSI/AISC 360 (2016: 16)

2.4.5.1. Batas Kelangsingan

Dikarenakan mutu material baja yang cenderung tinggi, maka dimensi batang tariknya dapat dirancang sangat langsing. Secara teori, kondisi kelangsingan hanya diperhitungkan untuk elemen tekan guna mengantisipasi tekuk. Batang tarik dalam teori tidak mengalami tekuk, sehingga kelangsingannya tidak dibatasi, hanya disarankan $L/r \leq 300$. Saran ini berdasarkan pengalaman yang mempertimbangkan segi ekonomis, kemudahan pengerjaan, serta meminimalisir resiko rusak saat konstruksi. Namun, elemen yang sangat langsing memiliki kecenderungan untuk bergoyang atau bergetar, dan menciptakan ketidaknyamanan bagi penghuninya.

Saran ini tidak berlaku apabila batang tariknya berfungsi sebagai struktur penggantung (hanger) ataupun apabila menggunakan penampang pejal (rod).

2.4.5.2. Kuat Tarik Nominal

Nilai kuat tarik rencana atau $\phi_t P_n$, ϕ_t adalah faktor ketahanan tarik sedangkan P_n adalah kuat aksi nominal, merupakan nilai paling kecil dari dua kontrol batas keruntuhan pada penampang utuh serta penampang berlubang atau tempat sambungan. Untuk kuat tarik pada penampang utuh adalah sebagai berikut:

$$P_n = F_y \cdot A_g \quad (2.41)$$

Dimana:

$\phi_t = 0,9$ terhadap keruntuhan leleh

$A_g =$ luas penampang bruto (gross)

Kekuatan tarik pada penampang berlubang memanfaatkan perilaku strain-hardening atau peningkatan tegangan dalam kondisi regangan inelastis yang diakibatkan oleh lonjakan tegangan yang terkonsentrasi pada sekitar lubang.

$$P_n = F_u \cdot A_e = F_u \cdot A_n \cdot U \quad (2.42)$$

Dimana:

$\phi_t = 0,75$ terhadap keruntuhan fraktur

$A_n =$ luas penampang bersih (netto)

$A_e =$ luas penampang efektif

$U =$ factor shear lag

Besaran nilai F_y dan F_u atau kuat leleh serta kuat tarik minimum, bergantung pada mutu material. Pada keruntuhan leleh atau yield tingkat kekakuannya melebihi keruntuhan fraktur, berdasarkan hal tersebut maka untuk faktor tahanan tarik (ϕ_t) keduanya sangat berbeda. Sehingga faktor keamanan pada keruntuhan fraktur lebih tinggi.

2.4.6. Dasar Perencanaan Batang Tekan

Batang tekan dimaksudkan untuk digunakan pada komponen struktur yang menanggung beban tekan yang terpusat tepat berada pada titik berat suatu penampang, seperti kolom yang hanya menanggung gaya aksial. Namun, secara umum, terdapat eksentrisitas yang disebabkan oleh ketidaklurusan batang, atau karena ketidaktepatan dalam pembebanan, serta kekangan dari tumpuannya yang dapat menghasilkan momen. ANSI/AISC 360 (2016: 23)

2.4.6.1. Parameter Batang Tekan

Nilai F_y dan F_u merupakan parameter material yang menentukan nilai kuat batang tarik, namun untuk batang tekan hanya nilai F_y yang digunakan karena F_u tidak tercapai. Selain hal tersebut, batang tekan dipengaruhi parameter lain, seperti konfigurasi bentuk fisik batang ataupun geometrinya.

Parameter geometri batang terdiri dari tiga hal yaitu, luasan penampang atau A , pengaruh dari bentuk penampang terhadap kekakuan lentur (I_{min}), panjang batang dan kondisi pertambatan atau tumpuan, yang diwakili oleh panjang efektif (KL). Ketiganya dapat diringkas lagi menjadi satu parameter tunggal, yaitu rasio kelangsingan batang (KL/r_{min}), dimana $r_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$ adalah radius girasi pada arah tekuk. Secara visual, tekuk dapat dibedakan menjadi dua, yaitu (1) tekuk lokal pada elemen penampang, dan (2) tekuk global pada kolom atau batang secara menyeluruh.

2.4.6.2. Klasifikasi Penampang dan Tekuk Lokal

Penyelesaian masalah tekuk lokal lebih kompleks dibanding tekuk global. Jika terjadi tekuk lokal, selain penyelesaiannya tidak sederhana, maka pemakaian penampangnya akan tidak efisien karena terjadi pada kondisi beban elastis (belum leleh).

Agar strukturnya optimal, maka resiko tekuk lokal harus dihindari. Untuk itu dibuat klasifikasi untuk memisahkan penampang tidak langsing dan langsing. Itu dilakukan dengan cara mengevaluasi rasio lebar-tebal (b/t) tiap-tiap elemen dari penampang. Elemen-elemen dipilah berdasarkan kondisi kekangannya, apakah

kedua sisinya tersambung kepada elemen lain atau masih ada sisi bebas. Nilai b/t setiap elemen profil penampang selanjutnya dibandingkan dengan nilai batas rasio b/t . Jika semua elemen tidak melebihi nilai batas rasio b/t , maka penampang diklasifikasikan sebagai penampang tidak langsing (ideal) dan sebaliknya sebagai penampang langsing.

2.4.6.3. Panjang Efektif Kolom

Panjang efektif kolom atau KL adalah cara sederhana tetapi efektif dalam memprediksi kekuatan kolom, yaitu dengan mencari korelasi bentuk tekuk yang berkesesuaian dengan rumus Euler ($P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$). Kondisi ideal tumpuan tidak mudah dievaluasi di lapangan, untuk itu rekomendasinya nilai K diperbesar. Meskipun akurat, tetapi implementasi tidak mudah, diperlukan proses penyederhanaan dari struktur real yang kompleks terlebih dahulu. Dalam hal ini cukup diklasifikasikan menjadi dua kategori dengan nilai K yang berbeda, yaitu:

Rangka tidak bergoyang : $0,5 \leq K \leq 1,0$

Rangka bergoyang : $1,0 \leq K \leq \infty$

2.4.6.4. Kuat Tekan Nominal

Tekuk global ditentukan oleh kelangsingan elemen penampang dan bentuknya. Ada tiga perilaku tekuk, yaitu (1) tekuk lentur; (2) tekuk torsi dan (3) tekuk lentur-torsi. Adapun tekuk global atau lokal tergantung klasifikasi penampang, jika penampangnya tidak-langsing maka tidak terjadi tekuk lokal, dan sebaliknya penampang langsing berisiko tekuk lokal terlebih dahulu. Karena tekuk terjadi pada kondisi elastis, sebelum leleh maka agar efisien perlu dipilih kolom penampang tidak langsing.

a. Tekuk Lentur

Tekuk lentur yang dimaksud adalah fenomena tekuk global pada penampang dengan klasifikasi elemen tidak langsing. Beban kritis yang menyebabkan tekuk tersebut telah dirumuskan oleh Euler. Sampai saat ini rumus tersebut tetap dijadikan dasar menentukan kuat nominal batang tekan (P_n). Agar berkesesuaian dengan cara perencanaan batang tarik, maka luas penampang utuh atau gross (A_g) dijadikan

konstanta tetap, adapun variabelnya adalah tegangan kritis (F_{cr}), yang dituliskan dalam format berikut.

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \quad (2.43)$$

Tegangan kritis, F_{cr} dihitung menggunakan syarat berikut, jika:

$$\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ atau } \frac{KL}{e} \leq 2,25, \text{ tekuk inelastis, maka:}$$

$$F_{cr} = (0,658^{F_y/F_e}) \cdot F_y \quad (2.44)$$

$$\frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ atau } \frac{KL}{e} > 2,25, \text{ tekuk elastis, maka:}$$

$$F_{cr} = 0,877 \cdot F_e \quad (2.45)$$

Dimana F_e = tegangan tekuk Euler (elastis), yaitu:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (2.46)$$

b. Tekuk Torsi dan Tekuk Lentur Torsi

Fenomena tekuk, selain lentur ada lagi yaitu puntir (tekuk torsi), atau gabungan keduanya yaitu tekuk lentur-torsi. Biasa terjadi pada penampang dengan kekakuan torsi yang relatif kecil, atau pusat geser dan pusat beratnya tidak berhimpit. Kapasitas tekan nominal penampang kolom tidak-langsing terhadap tekuk torsi dan lentur-torsi adalah sebagai berikut.

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \quad (2.47)$$

Tegangan kritis, F_{cr} dihitung menggunakan syarat berikut, jika:

Penampang siku ganda atau tee

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \right) \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{cry} \cdot F_{crz} \cdot H}{(F_{cry} + F_{crz})}} \right] \quad (2.48)$$

Untuk penampang yang lain, F_{cr} tetap dengan rumus tekuk lentur, tetapi tegangan tekuk elastis F_e dihitung dengan memasukkan pengaruh kekakuan torsi batangnya sebagai berikut:

a. Profil dengan sumbu simetri tunggal, maka:

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H} \right) \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{ey} \cdot F_{ez} H}{(F_{ey} + F_{ez})}} \right] \quad (2.49)$$

b. Profil dengan sumbu simetri ganda, maka:

$$F_e = \left(\frac{\pi^2 ECW}{(K2L)^2} + GJ \right) + \frac{1}{I_x + I_y} \quad (2.50)$$

2.4.6.5. Kolom Komposit Komponen Struktur Tekan

Kriteria untuk kolom komposit bagi komponen struktur tekan:

1. Luas penampang profil baja minimal sebesar 4% dari luas penampang komposit total.
2. Selubung beton untuk penampang komposit yang berintikan baja harus diberi tulangan baja longitudinal dan tulangan pengekang lateral. Tulangan baja longitudinal harus menerus pada lantai struktur portal, kecuali untuk tulangan longitudinal yang hanya berfungsi memberi kekangan pada beton. Jarak antar pengikat lateral tidak boleh melebihi 2/3 dari dimensi terkecil penampang kolom komposit. Luas minimum penampang tulangan transversal (atau longitudinal) tidak boleh kurang dari 0,18 mm² untuk setiap mm jarak antar tulangan transversal (atau longitudinal) terpasang. Tebal bersih selimut beton dari tepi terluar tulangan longitudinal dan transversal minimal sebesar 40 mm.
3. Mutu beton yang digunakan tidak lebih tinggi daripada 55 MPa dan tidak kurang dari 21 MPa untuk beton normal dan tidak kurang dari 28 MPa untuk beton ringan.
4. Tegangan leleh profil dan tulangan baja yang digunakan untuk perhitungan kekuatan kolom komposit tidak boleh melebihi 380 MPa.
5. Tebal minimum dinding pipa baja atau penampang baja berongga yang diisi beton adalah $b \sqrt{\frac{f_y}{3E}}$ untuk setiap sisi selebar b pada penampang persegi dan D

$\sqrt{\frac{fy}{8E}}$ untuk penampang bulat yang mempunyai diameter luar D Kuat rencana

kolom komposit yang menumpu beban aksial adalah $\phi_c N_n$, dengan $\phi_c = 0,90$

$$N_n = A_s \cdot f_{cr} \quad (2.51)$$

$$\text{dan } f_{cr} = \frac{f_{my}}{\omega}$$

untuk $\lambda_c \leq 0,25$ maka $\omega = 1$

untuk $0,25 < \lambda < 1,2$ maka $\omega = 1$

untuk $\lambda_c \leq 1,2$ maka $\omega = 1,25\lambda_c^2$

dengan,

$$\lambda_c = \frac{k c L}{v m \pi} \sqrt{\frac{f_{my}}{E_m}} \quad (2.52)$$

$$f_{my} = f_y + c_1 f_{yr} \left(\frac{A_r}{A_s}\right) + c_2 f_{c'} \left(\frac{A_r}{A_s}\right) \quad (2.53)$$

$$E_m = E + c_3 E_c \left(\frac{A_c}{A_s}\right) \quad (2.54)$$

Keterangan:

A_c = Luas penampang beton, (mm²)

A_r = Luas penampang longitudinal (mm²)

A_s = Luas penampang profil baja (mm²)

E = Modulus elistisitas baja (MPa)

E_c = Modulus elistisitas beton (MPa)

E_m = Modulus elistisitas perhitungan kolom komposit (MPa)

f_{cr} = Tegangan tekan kritis (MPa)

f_y = Tegangan leleh profil baja (MPa)

f_y = Tegangan leleh perhitungan kolom komposit (MPa)

$f_{c'}$ = kuat tekan karakteristik beton (MPa)

k_c = faktor Panjang efektif kolom

L = Panjang unsur Struktur (mm)

N_n = Kuat aksial Nominal (N)

r_m = jari-jari girasi kolom komposit (mm)

w = berat jenis beton (kg/m^3)

λ_c = parameter kelangsingan

ϕ_c = faktor reduksi beban aksial tekan

ω = faktor tekuk

Pada persamaan diatas, c_1 , c_2 , dan c_3 adalah koefisien yang besarnya:

a. Untuk pipa baja yang diisi beton:

$c_1 = 1,0$ $c_2 = 0,85$ dan $c_3 = 0,4$

b. Untuk profil baja yang diberi selubung beton:

$c_1 = 0,7$ $c_2 = 0,6$ dan $c_3 = 0,2$

Jari-jari girasi kolom komposit diambil lebih besar daripada jari – jari profil baja dan kolom beton. Pendekatan yang konservatif adalah dengan menggunakan jari-jari girasi yang terbesar antara profil baja dan kolom beton, yang dapat diambil sebesar 0,3 kali dimensi dalam bidang tekuk.

$r_m = r > 0,3 \cdot b$ (2.55)

Dengan:

r = Jari jari girasi profil baja dalam bidang tekuk

b = dimensi terluar kolom beton dalam bidang tekuk

2.4.7. Dasar Perencanaan Batang Portal (Balok – Kolom)

Menurut ANSI/AISC 360 (2016: 73) Batang baja terhadap gaya aksial saja (tarik atau tekan) hanya cocok untuk perencanaan struktur rangka batang (truss) dibebani pada titik buhul, dan berat sendirinya relatif kecil dibanding beban yang dipikul.

Sedangkan batang baja dengan momen lentur hanya cocok untuk struktur balok, yang besar momen lenturnya lebih dominan dibanding gaya geser yang terjadi. Struktur yang elemen batangnya menerima kombinasi gaya aksial dan momen sekaligus harus direncanakan dengan perhitungan batang portal (balok-kolom). Pada dasarnya perencanaan batang portal ditinjau terhadap kuat tekan dan juga kuat lenturnya. Dari tinjauan kuat tekan akibat gaya aksial dan kuat lentur akibat gaya lentur nantinya dihubungkan dengan persamaan interaksi antara kuat tekan dan kuat lentur sebagai berikut:

a. Jika $\frac{Pr}{P_c} \geq 0,2$, maka: $\frac{Pr}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mr_x}{M_{cx}} + \frac{Mr_y}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$ (2.56)

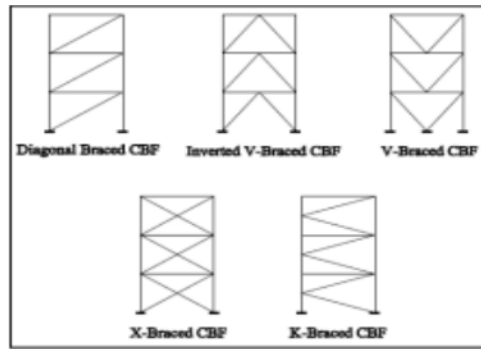
b. Jika $\frac{Pr}{P_c} \leq 0,2$, maka: $\frac{Pr}{2P_c} + \left(\frac{Mr_x}{M_{cx}} + \frac{Mr_y}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$ (2.57)

2.4.8. Sistem Bracing

Bracing atau bresing merupakan elemen struktur penahan gaya lateral. Elemen ini berupa batang yang dipasang pada portal struktur. Karakteristik dari elemen ini adalah dominasi aksial yang terjadi ketika gaya lateral terjadi. Di mana pada saat gempa terjadi, gaya lateral yang diterima oleh struktur akan diteruskan pada elemen bracing ini sebagai gaya-gaya aksial. Secara umum bentuk bracing yang digunakan untuk struktur portal terdiri dari dua, yaitu concentrically braced frame dan eccentrically braced frame. ANSI/AISC 360 (2016: 255)

a. Sistem Rangka Bracing Konsentrik

Kekakuan sistem ini terjadi akibat adanya elemen pengaku yang berfungsi sebagai penahan gaya lateral yang terjadi pada struktur. Penyerapan energi pada sistem ini dilakukan melalui pelelehan yang dirancang terjadi pada pelat buhul. Sistem ini daktilitasnya kurang begitu baik sehingga kegagalannya ditentukan oleh tekuk bracing. Contoh penerapan sistem rangka bracing konsentrik bisa dilihat pada Gambar 2.10

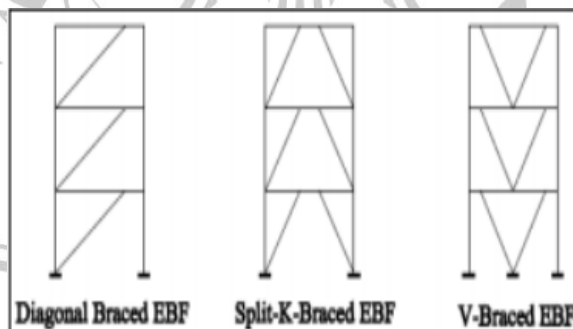


Gambar 2. 10 Sistem Bracing Konsentris

Sumber : Sumaidi, Wahyu (2020: 76)

b. Sistem Rangka Bracing Eksentrik

Pada sistem rangka bresing eksentrik, disingkat EBF, ada suatu bagian dari balok yang disebut link dan direncanakan secara khusus. EBF diharapkan dapat mengalami deformasi inelastis yang cukup besar pada link saat memikul gaya-gaya akibat beban gempa rencana karena element link tersebut berfungsi sebagai pendisipasi energi ketika struktur menerima beban gempa. Pendisipasi energi ini diwujudkan dalam bentuk plastifikasi pada elemen link tersebut. Hal tersebut yang menyebabkan sistem SRBE mempunyai nilai daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan SRBK yang lebih mengutamakan pada kekuatan strukturnya. Contoh penerapan sistem rangka bracing Eksentrik bisa dilihat pada Gambar 2.11



Gambar 2. 11 Sistem Bracing Eksentrik

Sumber : Sumaidi, Wahyu (2020: 76)

Pemilihan profil bracing tergantung dari besarnya gaya aksial yang bekerja, panjang bracing, kekakuan bracing, estetika dan ruang bebas yang diinginkan. Profil bracing bisa berupa profil siku ganda, profil kanal, profil T, profil WF dan

profil tampang berongga (bulat atau kotak). Pemilihan profil bracing juga mempertimbangkan sambungan yang akan dipakai.

2.4.9. Dasar Perencanaan Sambungan Struktur

Pemilihan jenis dan detail sambungan adalah ciri utama perencanaan konstruksi baja, yang jumlahnya sendiri relatif banyak dan bervariasi. Sistem sambungan untuk struktur baja relatif istimewa jika dibanding struktur beton. Umumnya pada struktur beton tidak mengenal istilah sambungan, maklum umumnya cor ditempat. Komponen struktur baja berbeda, tidak bisa dibuat sekaligus, tetapi dalam bentuk elemen-elemen lepas untuk dirakit dengan sambungan di lapangan. Oleh sebab itu sistem sambungan yang dipilih akan mempengaruhi kekuatan, biaya, cara, dan waktu pelaksanaannya sendiri. ANSI/AISC 360 (2016: 189)

Dari berbagai konfigurasi sambungan, juga orientasi pembebanan yang bekerja, maka gaya internal yang terjadi pada alat sambung baut hanya berupa gaya tarik dan gaya geser, atau gabungan keduanya. Berdasarkan hal itu, maka sambungan itu sendiri dapat dikelompokkan menjadi sambungan tipe geser dan sambungan tipe tarik atau gabungan dari keduanya.

2.4.9.1. Sambungan Baut Tipe Geser

Konfigurasi sambungan baut tipe geser dan cara pemasangan baut mutu tinggi, ternyata saling terkait dan mempengaruhi kekuatan dan kekakuan sambungan itu sendiri. Keterkaitannya menghasilkan dua mekanisme pengalihan gaya-gaya yang berbeda, yaitu mekanisme slip-kritis dan tumpu. Sambungan baut dengan mekanisme slip-kritis atau tumpu, tidak bisa dibedakan dari tampilan fisiknya saja. Mekanisme tersebut hanya akan terlihat setelah diberikan pembebanan. Jika pada beban rencana, baut tidak mengalami slip (tetap ditempat), maka saat itu mekanisme slip-kritis sedang bekerja. Kekuatannya tergantung dari besarnya tahanan friksi yang terjadi. Sebaliknya, jika pada saat dibebani, baut mengalami slip, maka mekanisme tumpu telah bekerja.

Sambungan slip-kritis adalah sambungan yang direncanakan tidak mengalami slip. Sistem itu diperlukan untuk mengatasi terjadinya beban bolak - balik (misal tarik jadi desak atau sebaliknya), yang umumnya ada pada jembatan. Jika itu

berlangsung terus-menerus, pada waktu lama maka struktur akan berisiko tinggi mengalami kerusakan fatig, yaitu keruntuhan pada kondisi tegangan elastis. Tentu saja tidak semua sambungan harus mempunyai ketahanan seperti itu. Bangunan gedung misalnya, sambungannya cukup direncanakan terhadap mekanisme tumpu saja, agar jumlah baut yang diperlukan lebih sedikit, yang berarti lebih ekonomis.

a. Mekanisme Slip Krisis Baut

Sambungan baut mutu tinggi tipe geser dengan mekanisme slip-kritis atau sambungan slip-kritis dipilih untuk konstruksi yang didominasi beban dinamik atau beban bolak-balik berganti tanda, yang umum terjadi pada jembatan atau mesin industri.

Tahanan slip-kritis nominal (R_n) untuk baut mutu tinggi adalah sebagai berikut:

$$R_n = \mu \cdot D_u \cdot h_f \cdot T_b \cdot n_s \quad (2.58)$$

Keterangan:

μ = koefisien slip rata-rata, tergantung kondisi permukaan. Pekerjaan persiapan mutu kelas-A adalah $\mu=0,3$ dan untuk mutu kelas-B (lebih ketat) adalah $\mu=0,5$

D_u = 1,13, adalah faktor pengali yang mempresentasikan gaya prategang baut rata-rata terpasang dengan gaya tarik baut prategang minimum

h_f = faktor terkait adanya pelat pengisi (filler), jika tidak ada filler atau hanya 1 filler maka $h_f = 1$, jika ada 2 filler diantara pelat sambung maka $h_f = 0,85$

T_b = gaya tarik baut prategang minimum

n_s = jumlah permukaan yang menimbulkan bidang kontak

Kuat batas slip-kritis, $R_u = \phi R_n$, dimana nilai ϕ tergantung bentuk dan ukuran lubang bautnya. Jika lubang standar atau lubang slot pendek yang dipasang tegak lurus arah beban, $\phi = 1,0$. Untuk lubang oversize dan slot pendek tetapi dipasang sejajar arah beban maka $\phi = 0,85$. Jika lubangnya adalah slot-panjang maka $\phi = 0,70$.

b. Mekanisme Tumpu Baut

Mekanisme tumpu hanya terjadi jika mekanisme slip-kritis gagal, ditandai dengan terjadinya slip. Istilah gagal, tidak berarti bahwa kondisinya telah runtuh, tetapi karena tahanan friksiya tidak lagi bekerja. Adapun sambungan tipe geser bermekanisme tumpu adalah didasarkan pada kondisi bagaimana memanfaatkan material secara maksimal, yaitu sampai kondisi inelastis (F_y dan F_u). Mekanisme ini menghasilkan kapasitas yang lebih besar, sehingga jumlah baut perlu relatif lebih sedikit dibanding jika memakai mekanisme slip-kritis.

1. Kuat tumpu baut

Kuat tumpu pelat sambungan memperhitungkan pengaruh deformasi. Jika besarnya itu akan mempengaruhi fungsi struktur sehingga kekuatannya perlu dibatasi maka dapat dipakai rumusan berikut dengan mengambil nilai yang terkecil.

$$R_n = 1,2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2,4 \cdot d \cdot t \cdot F_u \quad (2.59)$$

Selanjutnya jika terjadi deformasi pada sambungan dianggap tidak mempengaruhi fungsi maka kuat tumpu dapat ditingkatkan yaitu nilai terkecil persamaan berikut:

$$R_n = 1,5 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 3,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \quad (2.60)$$

dimana:

l_c = jarak bersih (mm) searah gaya, dihitung dari tepi lubang ke tepi pelat terluar (untuk baut pinggir) atau jarak bersih antar tepi lubang (untuk baut dalam)

F_u = kuat tarik minimum baja pelat yang ditinjau (MPa)

Untuk kuat tumpu dengan lubang baut tipe slot panjang yang arah slotnya tegak lurus arah gaya, maka kekuatannya berkurang dan dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_n = 1,0 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \quad (2.61)$$

Kuat geser baut

Jika pelat mengalami fenomena tumpu dan geser, maka pada baut juga demikian. Tetapi karena ukuran baut sudah tertentu, maka kerusakan akan terjadi lebih dahulu adalah geser. Oleh sebab itu dalam perencanaan yang dievaluasi hanya kuat geser

saja, yang relatif lebih lemah dibanding kuat tumpuannya. Rumus kuat geser baut per 1 bidang geser adalah sebagai berikut:

$$R_n = F_{nv} \cdot A_b \quad (2.62)$$

Dimana:

F_{nv} = tegangan geser nominal baut

A_b = luas penampang baut, bagian berulir atau polos, tergantung tegangan geser nominal yang dipakai

c. Kuat Balok Plat

Perhitungan kekuatan sambungan tipe geser dengan mekanisme tumpu didasarkan pada sambungan kekuatan individu masing-masing baut sambungan dengan jumlah baut yang relatif kecil. Tetapi untuk sambungan dengan jumlah baut yang relatif banyak, dengan penempatan yang berkelompok, dapat menyebabkan keruntuhan blok dalam satu kesatuan. Rumus kuat blok geser pelat adalah sebagai berikut:

$$R_n = 0,6 F_u \cdot A_{nv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \leq 0,6 F_y \cdot A_{gv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \quad (2.63)$$

Dimana:

F_u = kuat tarik minimum pelat sambungan (Mpa)

F_y = kuat leleh minimum pelat sambungan (Mpa)

A_{nv} = luas netto potongan yang mengalami gaya geser, garis batas blok searah gaya (mm^2)

A_{gv} = luas gross potongan yang mengalami gaya geser, garis batas blok searah gaya (mm^2)

A_{nt} = luas netto potongan yang mengalami gaya geser, garis batas blok tegak lurus gaya (mm^2)

U_{bs} = untuk tegangan tarik merata (uniform) $U_{bs} = 1,0$, dan yang tidak merata (gradien) $U_{bs} = 0,5$. Ini biasa dijumpai misalnya pada sambungan ujung dari balok dengan penempatan kolom baut secara ganda

d. Kekuatan Sambungan

Untuk mendapatkan kuat nominal sambungan, semua mekanisme keruntuhan yang teridentifikasi harus ditinjau, yaitu : (1) kuat tumpu (geser) pelat, yang merupakan jumlah kumulatif tahanan tumpu masing-masing baut yang mengalami kontak dengan pelat; (2) kuat geser baut, tergantung dari jumlah bidang geser per baut, jumlah baut di sambungan dan kuat geser nominal baut; (3) kuat geser blok, khusus untuk sambungan dengan jumlah baut yang relatif banyak dan ditempatkan secara berkelompok.

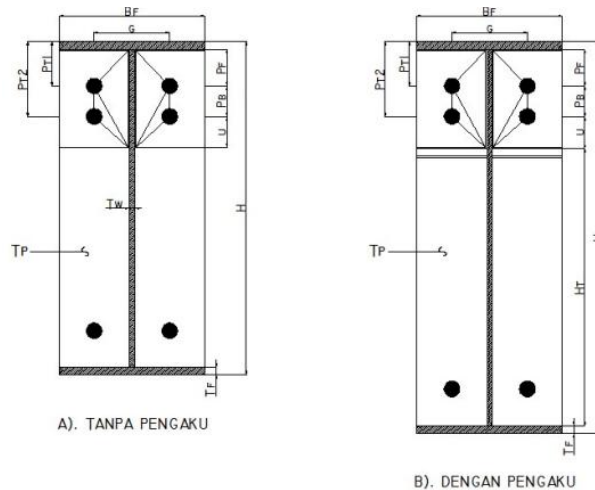
Kuat nominal maksimum, R_n dari sambungan ditentukan jika salah satu dari mekanisme diatas dapat tercapai terlebih dahulu. Itu artinya gaya terkecil yang menimbulkan mekanisme keruntuhan adalah yang menentukan. Selanjutnya kuat batas sambungannya adalah $R_u = \phi R_n$, dengan nilai faktor tahanan $\phi = 0,75$ untuk keseluruhan mekanisme keruntuhan yang ditinjau. Hal itu menandakan bahwa keruntuhan yang terjadi melibatkan keruntuhan fraktur yang relatif kurang daktail dibanding keruntuhan leleh.

2.4.9.2. Sambungan End Plate

Sambungan baut tipe tarik memiliki jumlah baut yang relatif sedikit, dan ada tambahan pelat khusus dilas pada ujungnya sehingga sering disebut sebagai sambungan end-plate. Jika komponen sambungan terpasang saling menempel rapat dengan lawan sambungannya, maka aplikasi sambungan end-plate dapat dipasang untuk balok-balok atau portal (kolom-balok) adalah yang bisa berupa end-plate juga atau pelat sayap profil kolom

a. Kapasitas Pelat Ujung

Kinerja sambungan end-plate tergantung kekuatan pelat ujungnya dan baut tarik. Teori garis leleh (yield line theory) adalah cara yang terbukti paling akurat untuk menghitung secara maksimal kekuatan pelat ujung. Gambar 2. 12 dibawah menunjukkan pola garis leleh untuk pelat tipe flush end plate



Gambar 2. 12 Pola Garis Leleh Pelat Tipe flush-end-plate

Sumber : Farlianti, Sari (2020: 111)

2. Flush-end-plate polos

Kuat sambungan end-plate terhadap kondisi batas terjadinya leleh pelat ujung yang dicari berdasarkan teori garis leleh SNI 1729:2020 yaitu:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\frac{b_f}{2} \left(\frac{h-p_t}{p_f} + \frac{h-p_{t2}}{u} \right) + 2(p_f + p_b + u) \left(\frac{h-p_t}{p_f} \right) \right] \quad (2.64)$$

Jika $M_u = \phi M_{pl}$ maka tebal pelat minimum dapat dicari:

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{b_f g \left(\frac{h-p_{t2}}{h-p_t} \right)} \quad (2.65)$$

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\frac{b_f}{2} \left(\frac{h-p_t}{p_f} + \frac{h-p_{t2}}{u} \right) + (p_f + p_b + u) \left(\frac{h-p_t}{p_f} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.66)$$

3. Flush-end-plate dengan pengaku

Kuat sambungan end-plate terhadap kondisi batas terjadinya leleh pelat ujung yang dicari berdasarkan teori garis leleh yaitu:

$$AA = (h - p_t) \left[\frac{b_f}{2p_f} + \frac{2}{g} (p_f + p_b) \right] \quad (2.67)$$

$$BB = 1,25 (h - p_{t2}) \left[\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_s} + \frac{1}{2h_t} \right) + \frac{g}{10p_s} + \frac{2}{g} + \left(\frac{p_b}{5} + p_s \right) \right] \quad (2.68)$$

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left\{ AA + \frac{1}{4} b_f + BB \right\} \quad (2.69)$$

Jika $M_u \leq \phi M_{pl}$ maka tebal pelat perlu dapat dicari dengan cara, berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{AA + \frac{1}{4} b_f + BB} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.70)$$

dimana:

F_{py} = tegangan leleh material pelat ujung

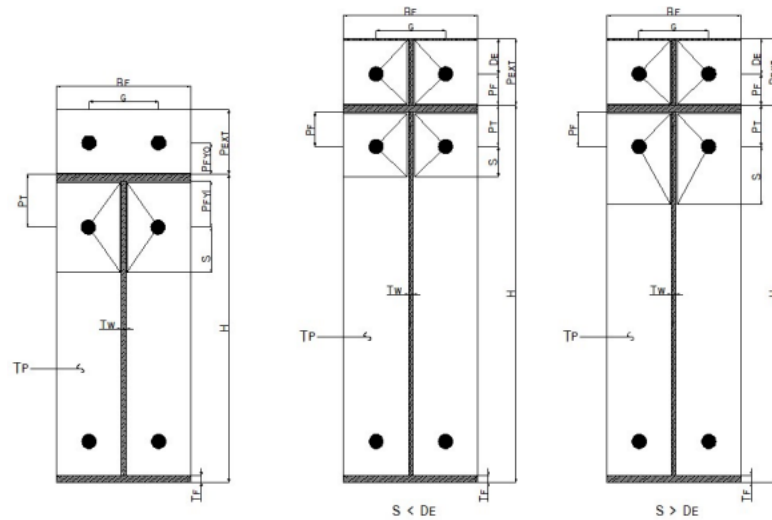
M_{pl} = kapasitas momen plastis pelat ujung

M_u = momen batas sambungan end-plate

ϕ = ketuntuhan lentur akibat leleh = 0,90



Pada extended end plate pola keruntuhannya bisa dilihat pada Gambar 2. 13



Gambar 2. 13 Pola keruntuhan berdasarkan garis leleh pelat tipe extended-end-plate

Sumber : Farlianti, Sari (2020: 111)

4. Extended-end-plate polos

Kuat sambungan end-plate terhadap kondisi batas leleh pelat berdasarkan teori garis leleh pada SNI 1729 (2020: 144) yaitu:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\left(\frac{bf}{2} \left(\frac{1}{p_{f,i}} + \frac{1}{s} \right) + (p_{f,i} + s) \frac{2}{g} \right) (h - p_t) + \frac{bf}{2} \left(\frac{h}{p_{f,i}} + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (2.71)$$

Jika $s = 1/2 (bf \cdot g)^{1/2}$ dan $M_u \leq \phi M_{pl}$ maka tebal pelat perlu berdasarkan kuat batas leleh dapat dicari sebagai berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\left(\frac{bf}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{s} \right) + (p_f + s) \frac{2}{g} \right) (h - p_t) + \frac{bf}{2} \left(\frac{h}{p_f} + \frac{1}{2} \right)} \right]^{1/2} \quad (2.72)$$

5. Extended-end-plate dengan pengaku

a. $s < d_e$

Kuat sambungan end-plate terhadap kondisi batas leleh pelat berdasarkan teori garis leleh pada SNI 1729 (2020: 144) yaitu:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\left(\frac{bf}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{s} \right) + (p_f + s) \frac{2}{g} \right) (h - p_t) + (h + p_t) \right] \quad (2.73)$$

Jika $s = 1/2 (bf \cdot g)^{1/2}$ dan $M_u \leq \phi M_{pl}$ maka tebal pelat perlu berdasarkan kuat batas leleh dapat dicari sebagai berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\left(\frac{bf}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{s}\right) + (p_f + d_e) \frac{2}{g}\right) (h - p_t) + (h + p_f)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.74)$$

b. $s > d_e$

Kuat sambungan end-plate terhadap kondisi batas leleh pelat berdasarkan teori garis leleh yaitu:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\left(\frac{bf}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{s}\right) + (p_f + d_e) \frac{2}{g}\right) (h - p_t) + (h + p_f) \right] \quad (2.75)$$

Jika $s = 1/2 (bf \cdot g)^{1/2}$ dan $M_u \leq \phi M_{pl}$ maka tebal pelat perlu berdasarkan kuat batas leleh dapat dicari sebagai berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\left(\frac{bf}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{2s}\right) + (p_f + d_e) \frac{2}{g}\right) (h - p_t) + (h + p_f)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.76)$$

dimana=

F_{py} = tegangan leleh material pelat ujung

M_{pl} = kapasitas momen plastis pelat ujung

M_u = momen batas sambungan end-plate

ϕ = ketuntahan lentur akibat leleh = 0,90

2.4.9.3. Kapasitas Baut

Sambungan end-plate ditentukan oleh kuat pelat ujung dan kuat baut tariknya. Gaya tarik pada baut dipengaruhi oleh kinerja pelat ujung. Jika pelat ujungnya mengalami deformasi, terjadi efek prying, yaitu adanya penambahan gaya tarik dibaut. Jika deformasinya relatif kecil dan dapat diabaikan, efek prying juga relatif kecil. Kuat sambungan didasarkan pada baut tanpa efek prying.

$$M_{np} = 2p_t (d_1 + d_2) \quad (2.77)$$

$$M_u = \phi M_{np} \quad (2.78)$$

Dimana:

M_{np} = kapasitas sambungan end-plate didasarkan pada kekuatan baut tanpa efek prying

p_t = kuat tarik baut, $p_t = A_b \cdot F_{nt}$

ϕ = keruntuhan fraktur baut = 0,75

2.4.9.4. Sambungan Base Plate

Struktur baja umumnya untuk bangunan di bagian atas, di bagian bawah khususnya pondasi mengandalkan struktur beton. Untuk menghubungkan keduanya perlu sambungan, yaitu base-plate. Pada prinsipnya pelat landasan (base-plate) dibuat untuk transfer gaya atau momen dari struktur baja yang relatif lebih kuat ke struktur beton yang lebih lemah tanpa mengakibatkan kerusakan karena beban telah terbagi merata ke base plate.

Base plate yang umum digunakan terdiri dari pelat landasan dan baut angkur. Adapun pelat landasan tersambung ke kolom baja dengan las. Secara teoritis, bisa saja baut angkur tidak diperlukan, tetapi dalam pelaksanaan harus dipasang. Minimal dua buah, untuk mengantisipasi momen tak terduga yang mungkin terjadi selama masa konstruksi.

a. Kuat Tumpu Beton

Kuat tumpu rencana adalah $\phi_c P_p$, dengan nilai $\phi = 0,65$. Adapun kuat tumpu nominal P_p tergantung dari luasan beton tumpuan yang tersedia, sebagai berikut:

1. Luas beton \cong luas pelat landasan, maka:

$$P_p = 0,85 \cdot f_c' \cdot A_1 \quad (2.79)$$

Atau dalam format tegangan tumpu nominal, maka:

$$f_{p(\text{maks})} = \phi_c \cdot 0,85 \cdot f_c' \quad (2.80)$$

2. Luas beton tumpuan $>$ luas pelat landasan yang besarnya merata pada semua sisi. Untuk itu kuat tumpu beton dapat ditingkatkan maksimum sampai dua kalinya:

$$P_p = 0,85 \cdot f_c' \cdot A_1 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \cdot f_c' \cdot A_1 \quad (2.81)$$

$$f_p(\text{maks}) = \phi_c \cdot 0,85 \cdot f_c' \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \cdot f_c' \quad (2.82)$$

dimana:

f_c' = kuat tekan beton yang diisyaratkan, Mpa

A_1 = luas beton yang dibebani gaya konsentris, mm²

A_2 = luas bawah piramida terpancung yang luas atas adalah A_1 , dimana sisi miringnya memiliki perbandingan rasio horizontal : vertikal adalah 2 : 1, mm²

Apabila luas beton tumpuan >> luas base plate secara merata, maka bagian beton tumpuan yang lebih besar dapat berfungsi sebagai struktur pengekang untuk bagian beton yang terbebani. Ini adalah salah satu cara agar kuat tumpunya bisa ditingkatkan lagi.

b. Tekan Konsentris

Jika base-plate bertumpu pada permukaan beton pondasi, maka dimensi pelat landasan (B x N) harus dipilih agar beton dibawahnya tidak rusak, dengan memenuhi ketentuan berikut:

$$f_p = \frac{Pu}{B \cdot N} \leq f_{p(\text{maks})} \quad (2.83)$$

Kuat perlu pada pelat landasan dapat ditentukan berikut:

$$M_{pl} = \frac{1}{2} f_p l^2 \quad (2.84)$$

Dimana l adalah nilai terbesar dari m, n dan $\lambda n'$

$$m = \frac{N - 0,95}{2} \quad (2.85)$$

$$n = \frac{B - 0,8bf}{2} \quad (2.86)$$

$$\lambda n' = \frac{1}{4} \lambda \sqrt{dbf} \quad (2.87)$$

$$\lambda = \frac{2\sqrt{x}}{1 + \sqrt{1-x}} \leq 1 \quad (2.88)$$

$$x = \left\{ \frac{4dbf}{(d+bf)^2} \right\} \frac{Pu}{\phi_c P_p} \quad (2.89)$$

cukup konservatif jika diambil $\lambda = 1$

untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan adalah:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4Mpl}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{2fp}{\phi F_y}} = 1 \sqrt{\frac{2Pu}{\phi F_y B N}} \quad (2.90)$$

dimana:

ϕ = faktor ketahanan terhadap lentur = 0,90

l = nilai maksimum dari m, n, dan $\lambda n'$, agar tebal pelat landasannya ekonomis maka parameter tersebut dibuat minimum, salah satunya adalah menetapkan $m = n$

c. Tegangan Beton Segitiga-Elastis

1. Momen kecil tanpa angkur

Pendekatan tegangan tumpu beton pada kondisi elastis (segitiga) sengaja dipilih karena memberi gambaran cukup rasional tentang efek eksentrisitas (e) akibat gaya tekan P_u terhadap base-plate. Nilai e disebut sedang jika tidak perlu baut angkur untuk keseimbangannya. Maka nilai eksentrisitas (e) terbagi menjadi dua keadaan:

a. Kecil, jika $e = \frac{Mu}{Pu} \leq \frac{N}{6}$

b. Menengah, jika $\frac{N}{6} \leq e \leq \frac{N}{2}$

2. Momen besar dengan angkur

Bila eksentrisitas gaya P_u besar, maka base-plate dapat terguling. Untuk menghindarinya harus dipasang baut angkur untuk menahan gaya tarik sebesar T_u akibat momen guling tersebut.

Ukuran pelat landasan dipilih sedemikian sehingga tegangan tekan beton, f_p tidak melebihi tegangan tumpu nominal beton. Untuk mencari nilai T_u dan A, dipergunakan persamaan keseimbangan vertikal dan momen sebagai berikut:

$$T_u + P_u = \frac{1}{2} f_p AB \quad (2.91)$$

$$P_u \left(\frac{N}{2} - x \right) + M_u = \frac{1}{2} f_p AB \left(N - x - \frac{A}{3} \right) \quad (2.92)$$

Jika $A' = \frac{N}{2} - x$ dan $f' = f_n B \frac{N-x}{2}$, dari persamaan diatas didapatkan:

$$A = \frac{f' \pm \sqrt{f'^2 f_p B (P_u A' + M_u)}}{\frac{1}{2} f_p B} \quad (2.92)$$

nilai $A \leq N'$, jika tidak memenuhi maka ukuran pelat landas tidak mencukupi, perlu ukuran lain. Gaya tarik baut angkur adalah:

$$T_u = \frac{1}{2} f_p AB - P_u \quad (2.93)$$

d. Tegangan Beton Persegi – Ultimate

1. Momen kecil tanpa angkur

Perencanaan base-plate dengan beban eksentris bisa berdasarkan asumsi distribusi tegangan beton berbentuk segitiga atau kondisi tegangan elastis. Jika beban bertambah sampai kondisi batas, perilaku elastis terlewati dan masuk kondisi inelastic, yaitu beton pada kondisi batas (ultimate) sesuai pada SNI 2847 (2019: 321).

$$q_{maks} = f_{p(maks)} \cdot B \quad (2.94)$$

$$y_{min} = \frac{P_u}{q_{maks}} \quad (2.95)$$

jika ϵ jarak resultan tumpu beton terhadap pusat berat kolom:

$$\epsilon_{maks} = \frac{N}{2} - \frac{y_{min}}{2} = \frac{N}{2} - \frac{p_u}{2q_{maks}} \quad (2.96)$$

$$e_{kritis} = \epsilon_{maks} = \frac{N}{2} - \frac{p_u}{2q_{maks}} \quad (2.97)$$

eksentrisitas beban $\leq e_{kritis}$ maka baut angkur tidak diperlukan.

2. Momen besar dengan angkur

Jika eksentrisitas beban tekan $e = M_u + P_u > e_{kritis}$ maka baut angkur diperlukan untuk mencegah base plate mengalami puntir.

Untuk mencari nilai T_u dan Y , dipergunakan persamaan keseimbangan gaya vertikal sebagai berikut:

$$T_u + p_u = qY \quad (2.98)$$

Juga keseimbangan momen terhadap titik B:

$$q_{maks} Y \frac{N}{2} - \frac{Y}{2} + f - p_u (e + f) = 0 \quad (2.99)$$

Setelah pengaturan diperoleh persamaan kuadrat berikut:

$$Y^2 - 2 \left(\frac{N}{2} + f \right) Y + \frac{2P_u (e+f)}{q_{maks}} = 0 \quad (2.100)$$

dan penyelesaian untuk Y adalah:

$$Y = \left(\frac{N}{2} + f \right) \pm \sqrt{\left(\frac{N}{2} + f \right)^2 - \frac{2P_u (e+f)}{q_{maks}}} \quad (2.101)$$

Pada suatu kombinasi gaya, momen dan ukuran base plate tidak diperoleh penyelesaian, sehingga dimensi base plate perlu diperbesar. Agar persamaan bisa diselesaikan, maka:

$$\left(\frac{N}{2} + f \right)^2 \geq \frac{2P_u (e+f)}{q_{maks}} = 0 \quad (2.102)$$

Gaya pada angkur adalah:

$$T_u = qY - P_u \quad (2.103)$$

Untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan adalah

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\phi f_y}} \quad (2.104)$$

Pada kondisi desak: momen terjadi akibat tegangan reaksi beton pada kantilever m dari tumpuannya.

Jika $Y \geq m$, maka:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_{pt}}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{4 \left(\frac{1}{2} f_p m^2 \right)}{0,90 \cdot f_y}} = 1,5 \cdot m \sqrt{\frac{f_p}{f_y}} \quad (2.105)$$

Jika $Y < m$, maka:

$$tp \geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{4\left(\frac{1}{2}fp m^2\right)}{0,90 \cdot f_y}} = 2,11 \sqrt{\frac{fpY\left(m-\frac{Y}{2}\right)}{f_y}} \quad (2.106)$$

Dimana:

$$fp = \frac{Pu}{BY} \quad (2.107)$$

Pada sisi tarik : momen terjadi akibat reaksi baut angkur yang bekerja seperti beban terpusat di pelat. Oleh sebab itu jumlah baut juga berpengaruh, khususnya terhadap lebar efektif pelat.

Tebal pelat landasan minimum untuk memikul baut angkur adalah:

$$tp \geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{4\left(\frac{T_u}{nb} \cdot \frac{a}{2a}\right)}{0,90 \cdot F_y}} = 1,5 \sqrt{\frac{T_u}{nb \cdot F_y}} \quad (2.108)$$

Dimana:

nb = jumlah baut angkur yang dipasang