

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Konsep *Gable Frame*

Struktur bangunan *gable frame* merupakan struktur yang terdiri dari elemen-elemen linear, pada umumnya kedua bagian dari struktur *gable frame* yaitu balok dan kolom akan saling dihubungkan pada setiap ujungnya oleh titik hubung atau biasa disebut dengan *joints*. Bangunan portal *gable* ini memiliki beberapa portal melintang yang tidak tertumpu secara transversal, namun tertumpu secara longitudinal. Komponen dalam struktur *gable frame* yang menunjang kekuatan strukturnya secara keseluruhan terdiri dari rafter, kolom, *base plate*, haunch dan stiffener. (Meidiani & Juita, 2017).

2.2 Material Baja

Salah satu material utama yang digunakan untuk konstruksi bangunan ialah material baja, material tersebut merupakan jenis material konstruksi yang unggul dalam segi kekuatan (tegangan), kekakuan (deformasi), dan daktilitasnya (perilaku keruntuhan). Berdasarkan keunggulan tersebut, material baja dapat digunakan untuk mengevaluasi struktur yang memikul pembebanan. Akan tetapi, ada keunggulan yang dimiliki material baja tersebut perlu dipertimbangkan juga pengaruh lingkungan yang mempengaruhi kelangsungan struktur bangunannya, sehingga perilaku ketahanan material terhadap kondisi lingkungan sekitarnya adalah hal yang perlu diketahui dan juga diantisipasi dengan baik pada saat perencanaannya (Dewobroto, 2016).

2.2.1 Hubungan Tegangan-Regangan

Uji tarik merupakan model pengujian yang tepat digunakan untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik dari material baja. Pada Gambar 2.1. menunjukkan hasil dari pengujian tarik material baja dengan suhu kamar serta memberikan laju regangan yang normal. Tegangan nominal (f) yang terjadi dalam benda uji diplot pada sumbu vertikal, sedangkan regangan (ϵ) yang merupakan perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang mula-mula ($\Delta L/L$) di plot pada sumbu horizontal (Setiawan, 2013).

Titik-titik penting yang terdapat dalam kurva tegangan-regangan antara lain:

f_p = batas proporsional

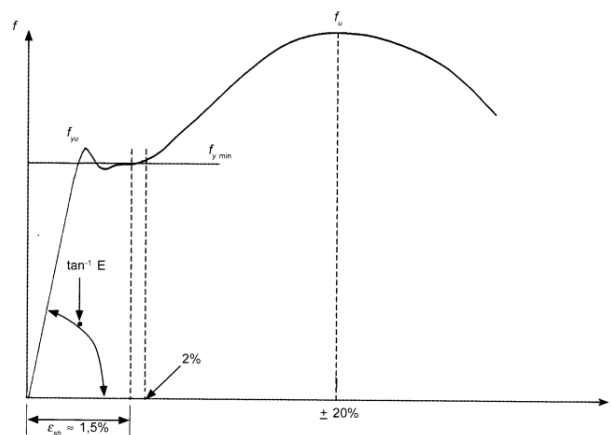
f_e = batas elastis

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

f_u = tegangan putus

ϵ_{su} = regangan saat mulai terjadi efek *strain-hardening* (penguatan reganga)

ϵ_u = regangan saat tercapai tegangan putus



Gambar 2.1 Kurva Hubungan Tegangan (f) vs Regangan (ϵ)
(Sumber: Setiawan, 2013)

2.2.2 Sifat Mekanis Baja

Sifat mekanis dari material baja yang digunakan pada proses perencanaan bangunan baja struktural harus memenuhi persyaratan minimum yang telah ditetapkan berdasarkan SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Jenis baja dibagi berdasarkan kelas mutu yang memiliki tegangan putus dan tegangan leleh yang berbeda dari setiap kelas mutu baja tersebut, berikut pada Tabel 2.1 jenis baja berdasarkan kelas mutunya:

Tabel 2.1 Klasifikasi Kelas Mutu Baja

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, f_u (MPa)	Tegangan leleh minimum, f_y (MPa)	Peregangan minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, f_u (MPa)	Tegangan leleh minimum, f_y (MPa)	Peregangan minimum (%)
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

(Sumber: Arifi & Setyowulan, 2021)

Selain kelas mutu baja, dalam SNI 1729:2020 juga memaparkan sifat mekanis baja lainnya yang telah ditetapkan sebagai acuan dalam perencanaan struktural baja, berikut uraiannya:

Moduls Elastisitas (E) = 200.000 MPa

Mouduls Geser (G) = 80.000 MPa

Nisbah Poisson (μ) = 0,3

Koefisien Pemuaian (α) = $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

2.2.3 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Material Baja

Dasar dari pemilihan penggunaan material baja dalam konstruksi bangunan ialah dikarenakan keuntungan yang dimiliki oleh material tersebut. Berikut keuntungan dari penggunaan baja:

1. Material penyusun yang terdapat dalam baja lebih seragam.
2. Material baja memiliki tingkat elastis yang tinggi sesuai dengan hukum *Hooke*.
3. Momen inersia pada material baja dapat dihitung secara akurat.
4. Material baja memiliki sifat daktilitas yang cukup tinggi, kemampuan dalam menahan deformasi besar tanpa terjadinya keruntuhan dengan tegangan tarik yang tinggi.
5. Dalam proses konstruksi, material baja akan mudah digabungkan dengan struktur yang sudah ada sehingga dapat mempercepat proses waktu pelaksanaan konstruksi.
6. Struktur yang dihasilkan bersifat permanen dengan cara pemeliharaan yang tidak terlalu sukar.

Selain itu kerugian atau kelemahan dari penggunaan material baja yang perlu diperhatikan agar terhindarnya dari keruntuhan atau kelemahan suatu struktur

bangunan ialah sebagai berikut:

1. Material baja akan mudah mengalami korosi apabila terpapar dengan udara dan air secara langsung, sehingga perlu adanya perawatan khusus seperti dilakukannya pengecatan anti korosi secara berkala.
2. Baja merupakan material penghantar panas yang sangat tinggi, sehingga perlu adanya pemberian lapisan tahan api (*fireproofing*) yang akan memakan biaya tambahan cukup besar.
3. Pada struktur batang tekan, baja mudah terjadinya tekuk (*buckling*).
4. Sifat lelah (*fatigue*) harus dipertimbangkan untuk elemen struktur dan sambungannya yang menahan beban secara berulang.
5. Keruntuhan akibat getas, di mana kondisi tertentu sifat daktilitasnya dapat hilang dan terjadi *brittle failure* pada bagian yang mempunyai konsentrasi tegangan yang tinggi.

2.3 Metode Load Resistance Factor Design (LRFD)

Penggunaan metode dalam ketentuan perencanaan struktur baja dapat menggunakan dua metode, yaitu metode ASD (*Allowable strength design*) dan LRFD (*Load Resistance Factor Design*). Metode LRFD didasarkan berdasarkan pada ilmu probabilitas, sehingga dapat mengantisipasi segala ketidakpastian dari material maupun beban yang bekerja (Bayu Ridwan & Bakhtiar, 2015).

Peraturan perencanaan baja yang berisi ketentuan LRFD yaitu terdapat pada SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Perencanaan LRFD dianggap memenuhi syarat jika kuat perlu (R_u) lebih kecil daripada kuat rencana (ϕR_n) dengan ϕ merupakan faktor tahanan yang nilainya bervariasi tergantung perilaku aksi komponennya. Sehingga konsep dasar dari metode LRFD adalah sebagai berikut:

$$R_u \leq \phi R_n \quad (2.1)$$

Keterangan:

R_u = kuat perlu dengan menggunakan kombinasi beban

ϕ = faktor tahanan

R_n = kekuatan nominal

ϕR_n = kekuatan rencana

Kuat perlu (R_u) merupakan nilai maksimum dari berbagai kombinasi beban terfaktor yang dicari dengan cara analisis struktur. Untuk mencari nilai R_u pada setiap elemen struktur, maka perlu dilakukannya analisis struktur secara menyeluruh atau *global*, hasil analisis tersebut maka dapat digunakan sebagai evaluasi elemen-per-elemen dan kemudian dibandingkan dengan kuat rencana (ϕR_n) yang ditinjau per-elemen sesuai dengan gaya internal yang terjadi. Tinjauan per elemen dilakukan karena karakter untuk setiap aksi dan perilaku keruntuhan akan menghasilkan reaksi yang berbeda-beda, oleh sebab itu nilai faktor tahanan (ϕ) dapat berbeda-beda (Dewobroto, 2016). Nilai faktor tahanan mengacu pada SNI 1729:2020 yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Faktor Tahanan (ϕ)

Komponen struktur	Faktor tahanan
Komponen struktur yang memikul lentur:	
- Balok	0,90
- Balok pelat berdinding penuh	0,90
- Pelat badan yang memikul geser	0,90
- Pelat badan pada tumpuan	0,90
- pengaku	0,90
Komponen struktur yang memikul gaya tekan aksial:	
- kuat penampang	0,85
- kuat komponen struktur	0,85
Komponen struktur yang memikul gaya tarik aksial:	
- terhadap kuat tarik leleh	0,90
- terhadap kuat tarik fraktur	0,75
Komponen struktur yang memikul aksi-aksi kombinasi:	
- kuat lentur atau geser	0,90
- kuat tarik	0,90
- kuat tekan	0,85
Komponen struktur komposit:	
- kuat tekan	0,85
- kuat tumpu beton	0,60
- kuat lentur dengan distribusi tegangan plastik	0,85

Komponen struktur	Faktor tahanan
- kuat lentur dengan distribusi tegangan elastik	0,90
Sambungan baut:	
- baut yang memikul geser	0,75
- baut yang memikul tarik	0,75
- baut yang memikul kombinasi geser dan tarik	0,75
- lapir yang memikul tumpu	0,75
Sambungan las:	
- sambungan las penetrasi penuh	0,90
- las sudut dan las tumpul penetrasi sebagian	0,75
- las pengisi	0,75

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

2.4 Konsep Pembebanan

Analisis beban merupakan langkah yang harus dilakukan dalam perencanaan struktur bangunan, ketepatan perhitungan pembebanan secara pasti tidak mudah dilakukan tanpa adanya aturan atau pedoman yang jelas (Dewobroto, 2016). Beban yang bekerja pada suatu bangunan terdiri dari dua jenis kategori, yaitu beban gravitasi dan beban lateral. Pada beban lateral terdiri dari beban mati (*Dead Load*), beban hidup (*Live Load*), dan beban hujan (*Rain Load*) sedangkan pada beban dinamik terdiri dari beban gempa (*Earthquake Load*) dan beban angin (*Wind Load*).

Acuan dalam perencanaan bangunan gedung dapat menggunakan SNI 1727:2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain, Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung (PPIUG 1983) dan SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung.

2.4.1 Beban Mati

Beban mati (*dead load*) terdiri dari berat bahan material konstruksi yang terdapat pada bangunan tersebut, tidak terbatas tembok, lantai, atap, anak tangga, partisi pemisah yang permanen, atau sejenisnya yang mendukung kepentingan arsitektur bangunan dan struktur itu sendiri (Dewobroto, 2016).

2.4.2 Beban Hidup

Beban hidup merupakan beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan. Besarnya beban hidup tergantung dari latar belakang masyarakat dan penegakan hukum yang diberikan. Beban hidup dalam struktur gedung akan lebih terprediksi karena memiliki akses yang tertutup (*private*). Selain itu terdapat juga beban hidup pada atap gedung dengan beberapa kriteria.

2.4.3 Beban Air Hujan

Struktur pada bagian dari atap dirancang untuk mampu menahan beban dari air hujan yang terakumulasi apabila sistem drainase primer pada bagian tersebut terhambat dan ditambah beban merata akibat kenaikan air di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran desainnya. Penentuan beban air hujan ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$R = 0,0098(d_s + d_h) \quad (2.2)$$

keterangan:

d_s = tinggi statis

d_h = kepala hidraulik

2.4.4 Beban Angin

Beban angin merupakan beban pada struktur yang disebabkan oleh tekanan-tekanan dari gerakan angin, beban bekerja berdasarkan lokasi dan ketinggian dari struktur itu sendiri. Mengacu pada SNI 1727-2020 beban desain angin untuk bangunan ditentukan berdasarkan tekanan angin desain (p) dan parameter-parameter pendukung lainnya. Berikut parameter dasar dalam menentukan beban desain angin.

1. Menentukan Kategori Risiko Bangunan

Bangunan dan struktur lainnya dikategorikan berdasarkan risiko bagi kehidupan manusia, kesehatan, dan kesejahteraan yang terkait dengan kerusakan atau kegagalan mereka dengan sifat hunian atau penggunaan. Kategori risiko ini dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Kategori Risiko Bangunan dan Struktur Lainnya untuk Beban Banjir, Angin, Salju, Gempa*, dan Es

Penggunaan atau pemanfaatan fungsi bangunan gedung dan struktur	Kategori risiko
Bangunan gedung dan struktur lain yang merupakan risiko rendah untuk kehidupan manusia dalam kejadian kegagalan	I
Semua bangunan gedung dan struktur lain kecuali mereka terdaftar dalam kategori risiko I, III, dan IV	II
Bangunan gedung dan struktur lain, kegagalan yang dapat menimbulkan risiko besar bagi kehidupan manusia.	III
Bangunan gedung dan struktur lain, tidak termasuk dalam kategori risiko IV, dengan potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi substansial dan/atau gangguan massa hari ke hari kehidupan sipil pada saat terjadi kegagalan.	
Bangunan gedung dan struktur lain tidak termasuk dalam risiko kategori IV (termasuk, namun tidak terbatas pada, fasilitas yang manufaktur, proses, menangani, menyimpan, menggunakan, atau membuang zat-zat seperti bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan peledak) yang mengandung zat beracun atau mudah meledak di mana kuantitas material melebihi jumlah ambang batas yang ditetapkan oleh pihak yang berwenang dan cukup untuk menimbulkan suatu macam kepada publik jika dirilis ^a	
Bangunan gedung dan struktur lain yang dianggap sebagai fasilitas penting.	IV
Bangunan gedung dan struktur lain, kegagalan yang dapat menimbulkan bahaya besar bagi masyarakat.	
Bangunan gedung dan struktur lain (termasuk, namun tidak terbatas pada, fasilitas yang memproduksi, memproses, menangani, menyimpan, menggunakan menggunakan, atau membuang zat-zat seperti bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya) yang berisi jumlah yang cukup dari zat yang sangat	

Penggunaan atau pemanfaatan fungsi bangunan gedung dan struktur	Kategori risiko
beracun di mana kuantitas melebihi jumlah ambang batas yang ditetapkan oleh pihak yang berwenang dan cukup untuk menimbulkan suatu macam kepada publik jika dirilis ^a	
Bangunan gedung dan struktur lain yang diperlukan untuk mempertahankan fungsi dari kategori risiko IV struktur lainnya.	
^a Bangunan gedung dan struktur lain mengandung racun, zat yang sangat beracun, atau bahan peledak harus memenuhi syarat klasifikasi terhadap kategori risiko lebih rendah jika memuaskan pihak yang berwenang dengan suatu penilaian bahaya seperti dijelaskan dalam pasal 1.5.3 bahwa pelepasan zat sepadan dengan risiko yang terkait dengan kategori risiko.	

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

2. Menentukan Kecepatan Angin Dasar, V

Kecepatan angin dasar digunakan untuk menentukan beban angin desain pada bangunan gedung dan struktur lain. Angin diasumsikan datang dari segala arah horizontal, kecepatan angin ini di perbesar jika catatan atau pengalaman menunjukkan kecepatan angin lebih tinggi daripada yang tercantum dalam Buku Peta Angin Indonesia.

3. Menentukan Parameter Beban Angin

Parameter-parameter dalam penentuan beban angin terbagi menjadi tujuh bagian, di antaranya:

a. Faktor arah angin, K_d

Faktor arah angin dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2.4 berikut ini.

Tabel 2.4 Faktor Arah Angin, K_d

Tipe struktur	Faktor arah angin, K_d
Bangunan gedung	
Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU)	0,85
Komponen dan Klading (K&K)	0,85
Atap lengkung	0,85
Kubah berbentuk bunder	1,0 ^a

Tipe struktur	Faktor arah angin, K_d
Cerobong, tangki. Dan struktur serupa	
Persegi	0,90
Segi enam	0,90
Segi delapan	1,0 ^a
Bundar	1,0 ^a
Dinding solid yang berdiri bebas, peralatan bagian atap, dan panel petunjuk solid yang berdiri bebas serta panel petunjuk terikat	0,85
Panel petunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal	0,85
Rangka bidang menara	
Segitiga, persegi, atau persegi panjang	0,85
Semua penampang lainnya	0,85
^a Faktor arah angin, $K_d = 0,95$ diizinkan untuk struktur bundar atau struktur segi delapan dengan sistem non-asimetris	

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

b. Kategori eskposur

Eskposur merupakan setiap arah angin yang diperhitungkan, eskposur arah melawan angin didasarkan pada kekasaran permukaan tanah yang ditentukan dari topografi alam, vegetasi, dan fasilitas yang telah dibangun. Kategori eskposur terbagi menjadi tiga bagian, di antaranya:

- 1) Eskposur B, untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1 m), eskposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh kekasaran permukaan B, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 1.500 ft (457 m). Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata lebih besar dari 30 ft (9,1 m), Eskposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan B berada dalam arah melawan angin untuk jarak lebih besar dari 2.600 ft (792 m) atau 20 kali tinggi bangunan atau struktur, pilih yang terbesar.

- 2) Eskposur C, berlaku untuk semua kasus di mana Eskposur B atau Eskposur D tidak berlaku.
- 3) Eskposur D, berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh kekasaran permukaan D, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 5.000 ft (1.524 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar. Eskposur D juga berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah dekat dari situs dalam arah melawan angin adalah B atau C, dan situs yang berada dalam jarak 600 ft (183) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar, dari Eskposur D sebagaimana ditentukan dalam kalimat sebelumnya.

Untuk situs yang terletak di zona transisi antara kategori eskposur, kategori dengan gaya angin terbesar harus digunakan. Pengecualian eskposur menengah di antara kategori-kategori sebelumnya boleh digunakan di zona transisi, asalkan itu ditentukan oleh metode analisis rasional yang dijelaskan dalam literatur yang diakui.

c. Faktor topografi, K_{zt}

Perhitungan beban angin desain harus memperhitungkan efek peningkatan kecepatan angin dengan menggunakan faktor topografi (K_{zt}) dengan persamaan sebagai berikut:

$$K_{zt} = (1 + K_1 + K_2 + K_3)^2 \quad (2.3)$$

Dengan K_1 , K_2 , dan K_3 diberikan dalam Gambar 26.8-1 SNI 1727-2020.

Jika kondisi situs dan lokasi bangunan gedung dan struktur lain tidak memenuhi semua kondisi yang disyaratkan dalam pasal 26.8.1 SNI 1727-2020, maka nilai $K_{zt} = 1,0$.

d. Faktor elevasi permukaan tanah, K_e

Faktor elevasi permukaan tanah ditentukan untuk menyesuaikan densitas udara, faktor ini dapat ditentukan sesuai dengan Tabel 26.9-1 pada SNI 1727-2020. Dan untuk semua elevasi dapat di ambil dengan nilai $K_e = 1$.

e. Faktor efek hembusan angin, G

Nilai faktor efek hembusan angin ini dapat ditentukan dengan nilai 0,85 untuk bangunan gedung dan struktur lain yang kaku.

f. Klasifikasi ketertutupan

Bangunan gedung dapat diklasifikasikan berdasarkan tipe ketertutupan, untuk menentukan tekanan koefisien internal klasifikasi ini terbagi menjadi klasifikasi sebagai bangunan tertutup, tertutup sebagian, terbuka sebagian, atau terbuka seperti yang dijelaskan dalam Pasal 26.2 SNI 1727-2020.

g. Koefisien tekanan internal (GC_{pi})

Nilai koefisien tekanan internal dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2.5 sebagai berikut.

Tabel 2.5 Koefisien tekanan internal, (GC_{pi})

Klasifikasi ketertutupan	Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan	Tekanan internal	Koefisien tekanan internal (GC_{pi})
Bangunan tertutup	A_o kurang dari terkecil $0,001A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Sedang	- 0,18 - 0,18
Bangunan tertutup sebagian	$A_o > 1,1A_o$ 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 - 0,55
Bangunan terbuka sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau klasifikasi terbuka	sedang	- 0,18 - 0,18
Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	diabaikan	0,00

CATATAN

1. Tanda plus dan minus menandakan tekanan yang bekerja ke arah menjauh dari permukaan dalam, masing-masing.
2. Nilai (GC_{pi}) harus digunakan dengan q_z atau q_h seperti yang disyaratkan.
3. Dua kasus harus diperhitungkan untuk menentukan beban kritis untuk kondisi yang sesuai:

- a. Nilai positif (GC_{pi}) diterapkan pada semua permukaan dalam, atau
- b. Nilai negatif (GC_{pi}) diterapkan pada semua permukaan dalam.

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

4. Menentukan Koefisien Eksposur Tekanan Velositas, K_z atau K_h

Menentukan nilai koefisien eksposur tekanan kecepatan, K_z atau K_h dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2.6 berikut ini.

Tabel 2.6 Koefisien Eksposur Tekanan Kecepatan, K_h dan K_z

Ketinggian di atas permukaan tanah		Eksposur		
ft	m	B	C	D
0-15	0-4,6	0,52 (0,70) ^a	0,85	1,03
20	6,1	0,62 (0,70) ^a	0,90	1,08
25	7,6	0,66 (0,70) ^a	0,94	1,12
30	9,1	0,70	0,98	1,16
40	12,2	0,76	1,04	1,12
50	15,2	0,81	1,09	1,27
60	18,0	0,85	1,13	1,31
70	21,3	0,89	1,17	1,34
80	24,4	0,93	1,21	1,38
90	27,4	0,96	1,24	1,40
100	30,5	0,99	1,26	1,43
120	36,6	1,04	1,31	1,48
140	42,7	1,09	1,36	1,52
160	48,8	1,13	1,39	1,55
180	54,9	1,17	1,43	1,58
200	61,0	1,20	1,46	1,61
250	76,2	1,28	1,53	1,68
300	91,4	1,35	1,59	1,73
350	106,7	1,41	1,64	1,78
400	121,9	1,47	1,69	1,82
450	137,2	1,52	1,73	1,86

Ketinggian di atas permukaan tanah		Eksposur		
ft	m	B	C	D
500	152,4	1,56	1,77	1,89
^a Gunakan 0,70 pada pasal 28 SNI 1727:2020, Eksposur B, apabila $z < 30$ ft (9,1 m)				

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

Koefisien eksposur tekanan kecepatan K_z dapat juga ditentukan dari rumus sebagai berikut:

$$K_z = 2,01(Z / Z_g)^{2/\alpha} \text{ Untuk, } 15 \text{ ft (4,6 m)} \leq z \leq z_g \quad (2.4)$$

$$K_z = 2,01(15 / Z_g)^{2/\alpha} \text{ Untuk, } z < 15 \text{ ft (4,6 m)} \quad (2.5)$$

Nilai α dan Z_g ditabulasi dalam Tabel 2.7 sebagai berikut:

Tabel 2.7 Konstanta Eksposur Dataran

Eksposur	α	Z_g (m)	$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	c	ℓ (m)	$\bar{e}$	Z_{min} (m) ^a
B	7,0	365,76	1/7	0,84	1/4,0	0,45	0,30	97,54	1/3,0	9,14
C	9,5	274,32	1/9,5	1,00	1/6,5	0,65	0,20	152,4	1/5,0	4,57
D	11,5	213,36	1/11,5	1,07	1/9,0	0,80	0,15	198,12	1/8,0	2,13
^a Z_{min} = tinggi minimum yang dapat menjamin tinggi ekuivalen $\bar{z}$ yang lebih besar dari 0,6h atau Z_{min} untuk bangunan atau struktur lain dengan $h \leq Z_{min}$, $\bar{z}$ harus di ambil sebesar Z_{min}										

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

5. Menentukan Tekanan Velositas, q_z atau q_h

Penentuan nilai Tekanan Kecepatan (q_z) yang di evaluasi pada ketinggian z di atas tanah dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$q_z = 0,613 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \quad (2.6)$$

Keterangan:

K_z = Koefisien eksposur tekanan kecepatan

K_{zt} = faktor topografi

K_d = faktor arah angin

K_e = faktor elevasi permukaan tanah

V = Kecepatan angin dasar

q_z = Tekanan kecepatan pada ketinggian z

6. Menentukan Koefisien Tekanan Eksternal, C_p atau C_N

Penentuan koefisien tekanan eksternal pada dinding dan atap dapat ditentukan dengan Tabel 2.8 dan Tabel 2.9 sebagai berikut:

Tabel 2.8 Koefisien Tekanan Dinding, C_p

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 di sisi angin pergi	2	-0,5	q_h
	≥ 4	-0,2	q_h
Dinding tepi	Seluruh nilai	-0,7	q_h

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

Tabel 2.9 Koefisien Tekanan Atap, C_p , untuk digunakan dengan q_h

Arah angin	Di sisi angin datang									Di sisi angin pergi		
	Sudut, θ (derajat)									Sudut, θ (derajat)		
	h/L	10	15	20	25	30	35	45	$\geq 60^c$	10	15	≥ 20
Tegak lurus terhadap bubungan untuk $\theta \geq 10^\circ$	$\leq 0,25$	-0,7	-0,5	-0,3	-0,2	-0,2	0,0 ^a		0,010	-0,3	-0,5	-0,6
		0,18	0,0 ^a	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4				
		-0,9	-0,7	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	0,0 ^a				
	0,5	-0,18	-0,18	0,0 ^b	0,2	0,2	0,3	0,4	0,010	-0,5	-0,5	-0,6
		-1,3 ^b	-1,0	0,7	-0,5	-0,3	-0,2	0,0 ^a				
	$\geq 1,0$	-0,18	-0,18	-0,18	0,0 ^a	0,2	0,2	0,4	0,010	-0,7	-0,6	-0,6
Arah angin	h/L	Jarak horizontal dari tepi sisi angin datang					C_p					
Tegak lurus terhadap bubungan	$\leq 0,5$	0 sampai dengan h/2					-0,9, -0,18					
		h/2 sampai dengan h					-0,9, -0,18					
		h sampai dengan 2h					-0,5, -0,18					

Arah angin	Di sisi angin datang									Di sisi angin pergi		
	Sudut, θ (derajat)									Sudut, θ (derajat)		
	h/L	10	15	20	25	30	35	45	$\geq 60^c$	10	15	≥ 20
n untuk $\theta < 10^\circ$		$> 2h$					$-0,3, -0,18$					
Sejajar bubunga	$\geq 1,0$	0 sampai dengan $h/2$					$-1,3^b, -0,18$					
n untuk semua θ		$> h/2$					$-0.7, -0,18$					
^a Nilai disediakan untuk keperluan interpolasi.												
^b Nilai dapat direduksi secara linier dengan luas yang sesuai berikut ini:												
^c Untuk kemiringan atap lebih besar dari 80° , digunakan $C_p = 0,8$												

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

7. Menghitung Tekanan Angin, p

Tekanan angin desain untuk SPGAU bangunan gedung pada semua ketinggian dalam (N/m^2) untuk bangunan gedung tertutup, kaku tertutup sebagian dan fleksibel dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (2.7)$$

Keterangan:

q = q_z untuk dinding di sisi angin datang yang diukur pada ketinggian z di atas permukaan tanah.

q = q_h untuk dinding di sisi angin pergi, dinding samping, dan atap yang diukur pada ketinggian h .

q_i = q_h untuk dinding di sisi angin datang, dinding samping, dinding sisi angin pergi, dan atap bangunan gedung tertutup, dan untuk mengevaluasi tekanan internal negatif pada bangunan gedung tertutup sebagian.

q_i = q_z untuk mengevaluasi tekanan internal positif pada bangunan gedung tertutup sebagian bila tinggi z ditentukan sebagai level dari bukaan tertinggi pada bangunan gedung yang dapat mempengaruhi tekanan internal positif.

G = faktor efek hembusan angin

C_p = koefisien tekanan eksternal

(GC_{pi}) = koefisien tekanan internal

2.4.5 Beban Gempa

Prosedur analisis beban gempa mengacu pada SNI 1726 – 2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung. Dalam peraturan tersebut menjelaskan bahwa perencanaan pengaruh gempa rencana harus ditinjau terlebih dahulu dan struktur dari bangunan gedung harus dilakukan pengevaluasian (Rifandi & Walujodjati, 2021). Gempa rencana yang ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%.

1. Faktor keutamaan gempa dan kategori risiko struktur bangunan

Kategori risiko struktur bangunan gedung dan non gedung yang telah diklasifikasikan berdasarkan fungsinya yang berdasarkan Tabel 2.10 pada pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa (I_c) yang tertera dalam Tabel 2.11 khusus untuk bangunan dengan kategori risiko IV, bila dibutuhkan pintu masuk untuk operasional dari struktur bangunan yang bersebelahan, maka struktur bangunan yang bersebelahan tersebut harus didesain sesuai dengan kategori risiko IV.

Tabel 2.10 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: - Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,II,IV termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:	II

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
- Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/rumah susun - Pusat perbelanjaan/mall - Fasilitas manufaktur - Pabrik	
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo Gedung dan nongedung, tidak termasuk ke dalam 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, penanggungan atau tempat	III

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
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.	
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 dan unit gawat darurat. - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan, bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki 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 struktur IV	IV

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

Tabel 2.11 Faktor Keutamaan Gempa

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

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

2. Klasifikasi situs

Prosedur dalam mengklasifikasikan suatu kelas situs yaitu bertujuan untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Penetapan kelas situs dapat melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium, yang dilakukan oleh otoritas berwenang atau ahli dalam desain geoteknik yang sudah bersertifikat, dengan minimal mengukur secara independen dua dari tiga parameter yang tercantum dalam Tabel 2.12 berikut.

Tabel 2.12 Klasifikasi Situs

Kelas situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{V}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (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. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40 \%$, 3. Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifikasi dan analisis)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah		

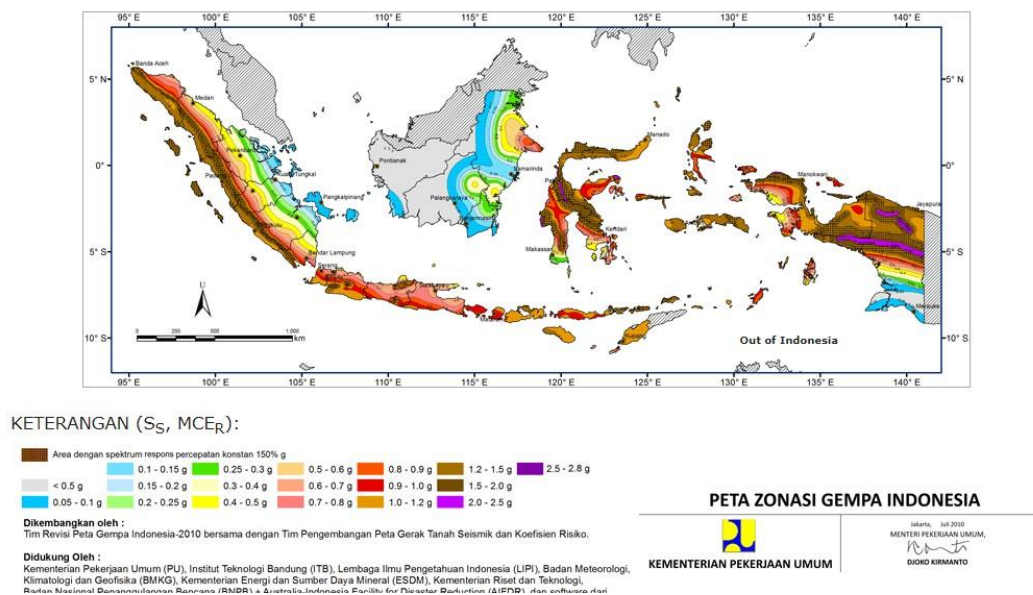
Kelas situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{V}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
respons spesifikasi situs yang mengikuti 0)	- Lempung sangat organis dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u < 50$ kPa		

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

CATATAN: N/A = Tidak dapat dipakai

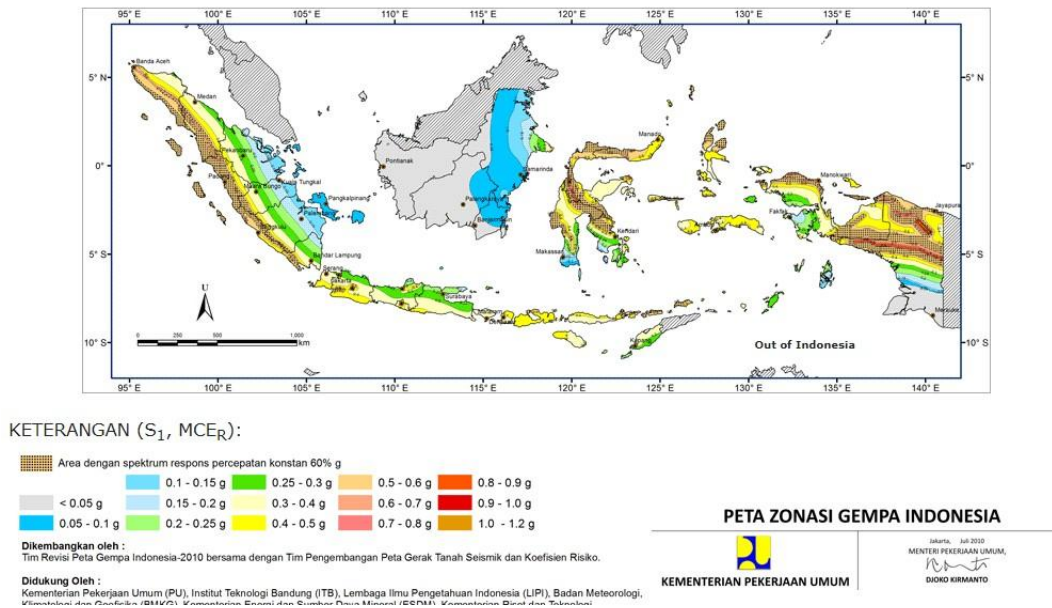
3. Parameter Percepatan Terpetakan

Parameter percepatan batuan dasar pada periode pendek (S_s) dan percepatan batuan dasar pada periode 1 detik (S_1) ditetapkan berdasarkan respon spektral percepatan 0,2 detik dan 1 detik dalam peta gerak tanah seismik (Gambar 2.2 dan Gambar 2.3) dengan kemungkinan 2% terlampaui dalam 50 tahun (MCE_R , 2% dalam 50 tahun) yang dinyatakan dalam bentuk desimal terhadap gravitasi.



Gambar 2.2 Peta Respon Spektra Percepatan 0,2 Detik (S_s) Terlampaui 2% dalam 50 Tahun

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)



Gambar 2.3 Peta Respon Spektra Percepatan 1 Detik (S_1) Terlampaui 2% dalam 50 Tahun

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

- Koefisien situs dan parameter-parameter respons spectral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R)

Respons spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah ditentukan oleh faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi tersebut meliputi parameter faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v) yang ditentukan berdasarkan Tabel 2.13 dan Tabel 2.14 untuk menentukan nilai respon spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2.8)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2.9)$$

Keterangan:

S_s = parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R terepetakan untuk periode pendek

S_1 = parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R terepetakan untuk periode 1 detik

Tabel 2.13 Koefisien Situs, F_a

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

CATATAN:

(a) SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

Tabel 2.14 Koefisien Situs, F_v

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
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: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

CATATAN:

(a) SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

5. Parameter percepatan spektral desain

Penentuan nilai parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan periode 1 detik (S_{D1}) dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.10)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.11)$$

6. Spektrum respons desain

Penggunaan tata cara spektrum respons desain disempurnakan dengan kurva spektrum respons desain dengan mengacu berdasarkan Gambar 2.4. Penggunaan kurva tersebut jika prosedur gerak tanah dari spesifikasi situs tidak digunakan. Berikut ketentuan yang harus dikembangkan dari kurva spektrum desain:

- a. Periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a diambil persamaan sebagai berikut:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.12)$$

- b. Periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a sama dengan

$$S_a = S_{DS} \quad (2.13)$$

- c. Periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil persamaan sebagai berikut:

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

- d. Periode lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil persamaan sebagai berikut:

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

Keterangan:

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

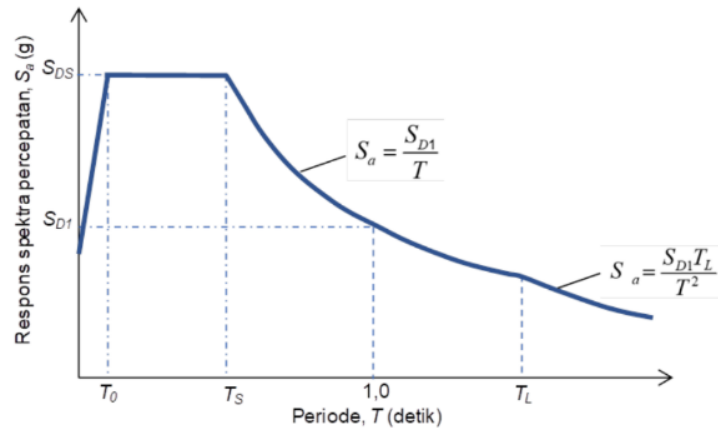
S_{D1} = parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik;

T = parameter getar fundamental struktur.

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

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

T_L = peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Spektrum Respons Desain
(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

7. Kategori desain seismik

Struktur yang direncanakan harus ditetapkan ke dalam kategori desain seismik yang lebih parah dengan berdasarkan Tabel 2.15 dan Tabel 2.16.

Tabel 2.15 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan 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
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

Tabel 2.16 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan 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

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$0,133 \leq S_{DI} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{DI}$	D	D

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

8. Kombinasi sistem struktur dalam arah yang berbeda

Sistem pemikul gaya yang berbeda diizinkan untuk digunakan menahan gaya seismik pada masing-masing arah kedua sumbu ortogonal struktur. Apabila penggunaan sistem yang berbeda, maka masing-masing nilai parameter R , C_d , dan Ω_0 diterapkan pada setiap sistem yang termasuk batasan sistem struktur berdasarkan Tabel 12 pada SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung.

2.4.6 Kombinasi Pembebanan

Berdasarkan sistem *Load Resistance Factor Design* (LRFD) yang mengacu pada SNI 1729:2020 menjelaskan bahwa berdasarkan jenis-jenis beban yang ada dapat menggunakan kombinasi beban yang berdasarkan pada pasal 2.3 ASCE/SEI 7 (SNI 1727:2020) berikut ini:

- 1,4 D
- 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (Lr atau S atau R)
- 1,2 D + 1,6 (Lr atau S atau R) + (L atau 0,5W)
- 1,2 D + 1,0 W + L + 0,5 (Lr atau S atau R)
- 0,9 D + 1,0 W

Kombinasi dasar dengan efek beban seismik yang didefinisikan berdasarkan pada Pasal 7.4.2 dan Pasal 7.4.3.1 di SNI 1726 sebagai berikut:

- 1,2 D + E_v + E_h + L + 0,2 S
- 0,9 D – E_v + E_h

Keterangan:

- D adalah beban mati yang dilibatkan oleh berat konstruksi permanen, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, partisi tetap, tangga, dan peralatan layan tetap.
- L adalah beban hidup yang ditimbulkan oleh penggunaan gedung, termasuk kejut, tetapi tidak termasuk beban lingkungan seperti angin, hujan dan

lainnya.

Lr adalah beban hidup di atap yang ditimbulkan oleh penggunaan perawatan oleh pekerja, peralatan dan material atau selama penggunaan biasa oleh orang dan benda bergerak.

R adalah beban hujan, tidak termasuk yang diakibatkan genangan air.

W adalah beban angin

E adalah beban gempa, yang ditentukan menurut SNI 1726:2019, atau penggantinya.

2.5 Profil Baja Kastela

Penggunaan profil baja kastela dalam rekayasa struktur baja cukup banyak diminati karena memiliki rasio kekuatan terhadap bebannya yang baik, penggunaan material yang efisien, dan kemampuan dalam menjangkau area yang luas. Bentuk dari balok baja kastela ini membentuk pola sarang lebah atau bisa disebut “*Honeycomb*” yang khas (Uikey, 2024).

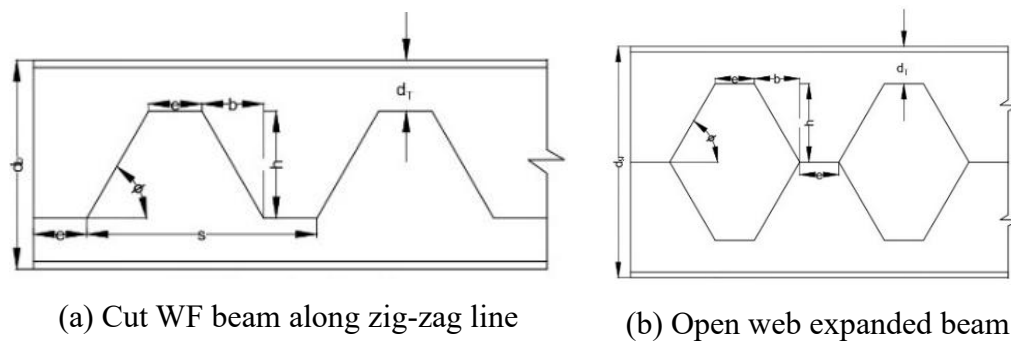
Baja kastela adalah suatu profil baja yang dipotong secara zig-zag pada bagian tengah badan baja yang kemudian disatukan kembali menggunakan las. Balok baja kastela dapat meningkatkan properti penampang secara signifikan. Untuk struktur yang sama, beratnya akan lebih ringan (Pang dkk., 2025). Selain itu terdapatnya pola lubang pada balok akan memudahkan penempatan utilitas M&E sehingga memudahkan dalam perencanaan. Berdasarkan teori pada balok lentur mendeskripsikan bahwa tegangan maksimum yang bekerja pada profil I terjadinya di area pelat sayap, sedangkan di pelat badan relatif lebih kecil yang bahkan menghasilkan nilai nol di sumbu netral. Besarnya momen inersia ditentukan berdasarkan jarak antara pelat sayap, maka dari itu terciptanya sistem pada balok baja kastela ini bertujuan untuk bagaimana cara meningkatkan momen inersia profil I *hot-rolled* tanpa tambahan material, sehingga ditemukan cara dengan membelah material profil I dengan mesin pemotongan *plasma* sesuai pola (**Error! Reference source not found.**) dan menyambungkan kembali dengan pengelasan (Dewobroto, 2016).

Baja kastela memiliki kekurangan yaitu mudahnya terjadi tekuk pada area dengan gaya geser yang besar, hal tersebut disebabkan oleh pada balok terlentur dengan beban merata di daerah tumpuan akan mengalami gaya geser yang besar

jika dibandingkan dengan daerah tengah bentang. Maka keruntuhan akibat tekuk akan terjadi sebelum mencapai beban maksimum (Ahad Ghifar Ente dkk., 2017).

2.5.1 Geometri Potongan Balok Kastela

Produksi pembuatan balok kastela dilakukan dengan pola pemotongan zig-zag dan geometri hasil pemotongan pelat badan profil akan menentukan nilai dari bagian yang akan dipotong dan juga nilai dari besaran balok yang akan dipakai dalam perhitungan kekuatan balok. Pola pemotongan dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pola Pemotongan Baja Kastela

(Sumber: W. Blodgett, 1976)

Proses pemotongan akan terlebih dahulu diperhitungkan berapa besar nilai jarak (e) dan b serta sudut kemiringan yang ditentukan, hal tersebut bertujuan untuk menghindari kurang tepatnya dalam proses penyambungan kembali profil baja menjadi profil kastela. Ketentuan nilai e dapat diatur dalam batas-batas yang diizinkan, karena nilai e sangat berpengaruh terhadap tegangan lentur penampang profil. Berikut persamaan-persamaan yang digunakan dalam menentukan ukuran pemotongan balok kastela.

$$\tan \phi = \frac{h}{b} \text{ atau } b = \frac{h}{\tan \phi} \quad (2.16)$$

$$d_g = d_b + h \quad (2.17)$$

$$d_T = \frac{d_b - h}{2} \quad (2.18)$$

$$s = 2 \cdot (b + e) \quad (2.19)$$

Sudut yang digunakan pada umumnya sekitar 45° sampai 70°, sudut yang paling banyak digunakan di lapangan sebesar 60°. Penentuan sudut bertujuan agar

tegangan geser horizontal sepanjang garis netral pada badan profil tidak melampaui tegangan geser izin.

2.5.2 Perencanaan Penampang Balok Kastela

Perencanaan penampang pada balok kastela dapat ditentukan dengan persamaan-persamaan berdasarkan *Design of Welded Structures*, mengenai *Open web expanded beams and girde* (W. Blodgett, 1976).

1. Menentukan nilai moduls penampang kastela yang diperlukan untuk momen lentur maksimum (S_g)

$$S_g = \frac{M}{\sigma} \quad (2.20)$$

Keterangan:

S_g = moduls penampang balok kastela (cm^3)

M = momen (kg.m)

σ = tegangan leleh profil baja (Mpa)

2. Menentukan perbandingan antara balok kastela dengan tinggi balok aslinya (K_1)

$$K_1 = \frac{d_g}{d_b} \quad (2.21)$$

Keterangan:

K_1 = perbandingan antara tinggi balok sebelum peninggian dan setelah peninggian

d_g = tinggi balok kastela (mm)

d_b = tinggi balok asli (mm)

3. Menentukan tinggi potongan zig-zag kastela (h)

$$h = d_b \cdot (K_1 - 1) \quad (2.22)$$

Keterangan:

h = pertambahan tinggi akibat pemotongan (mm)

K_1 = perbandingan antara tinggi balok sebelum peninggian dan setelah peninggian

d_b = tinggi balok asli (mm)

4. Menentukan perkiraan tinggi penampang T yang direncanakan dan tinggi balok kastela (d_T)

$$d_T \geq \frac{V}{2t_w \sigma} \quad (2.23)$$

$$h = d_b - 2 \cdot d_T \quad (2.24)$$

Keterangan:

d_T = tinggi penampang T (mm)

V = gaya geser (kg)

t_w = tebal pelat badan balok, web (mm)

σ = tegangan leleh profil baja (MPa)

Persamaan yang digunakan dalam menentukan tinggi balok kastela (d_g) adalah sebagai berikut:

$$d_g = d_b + h \quad (2.25)$$

5. Menentukan nilai tinggi penampang T yang digunakan (d_T)

$$d_T = \left(\frac{d_g}{2} \right) - h \quad (2.26)$$

6. Menentukan nilai tinggi pelat badan (web) penampang T (d_s)

$$d_s = d_T - t_f \quad (2.27)$$

Keterangan:

t_f = tebal pelat sayap profil, *flange* (mm)

7. Menentukan nilai tegangan lentur pelat badan kastela yang diizinkan ($\bar{\sigma}$)

Nilai tegangan lentur izin pada pelat badan kastela dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\bar{\sigma} = \left[1 - \frac{10,434}{C_c^2} \left(\frac{h}{t_w} \right)^2 \right] \cdot 0,6\sigma \quad (2.28)$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma}} \quad (2.29)$$

Keterangan:

$\bar{\sigma}$ = tegangan lentur izin balok kastela (MPa)

σ = tegangan leleh profil baja (MPa)

8. Menentukan nilai tegangan geset pelat badan kastela yang berlubang (σ_v)

$$\sigma_v = \frac{4 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \theta}{180} \right)^2}{3 \tan \theta} \cdot \bar{\sigma} \leq 0,4 \sigma_y \quad (2.30)$$

Tegangan maksimum:

$$\sigma_{\max} = 1,16 \frac{95\% \cdot V}{t_w \cdot d_g} \quad (2.31)$$

9. Menentukan nilai rasio tegangan geser pada potongan pelat badan solid (K_2)

$$K_2 = \frac{e}{s} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_v} \quad (2.32)$$

Jarak interval lubang segi enam penampang kastela (s):

$$s = 2(e + h \tan \theta) \quad (2.33)$$

Panjang bagian lubang kastela (e):

$$e \geq \frac{2 \cdot h \cdot \tan \theta}{\left(\frac{1}{K_2} \right) - 2} \quad (2.34)$$

10. Menentukan perluasan penampang T kastela (A_T)

$$A_T = A_f + A_s \quad (2.35)$$

Luas pelat sayat penampang T (A_f), mm

$$A_f = b + t_f \quad (2.36)$$

Luas pelat badan penampang T (A_s), mm

$$A_s = d_s + t_w \quad (2.37)$$

11. Menentukan nilai moduls kelembaman penampang T (M_y)

$$M_T = A_f \left(d_s + \frac{t_f}{2} \right) + A_s \left(\frac{d_s}{2} \right) \quad (2.38)$$

12. Menentukan momen inersia penampang T (I_T)

$$I_T = A_f \left(d_s^2 + d_s t_f + \frac{t_f^2}{3} \right) + A_s \left(\frac{d_s^2}{3} \right) \quad (2.39)$$

13. Menentukan katak titik berat penampang T pada ujung tangkai balok kastela (C_s)

$$C_s = \frac{M_T}{A_T} \quad (2.40)$$

14. Menentukan nilai momen inersia tangkai penampang T (I_t)

$$I_t = I_T - C_s \cdot M_T \quad (2.41)$$

15. Menentukan moduls tahanan tangkai penampang T (S_s)

$$S_s = \frac{I_t}{C_s} \quad (2.42)$$

16. Menentukan jarak titik berat penampang T atas dan penampang T bawah (d)

$$d = 2(h + C_s) \quad (2.43)$$

17. Menentukan momen inersia penampang kastela (I_g)

$$I_g = 2I_T + \frac{A_T d^2}{2} \quad (2.44)$$

18. Menentukan moduls tahanan penampang kastela (S_g)

$$S_g = \frac{2 \cdot I_g}{d_g} \quad (2.45)$$

19. Menentukan jarak interval lubang segi enam penampang kastela (s)

$$S = 2(e + h_t \theta) \quad (2.46)$$

2.6 Desain Batang Tarik

Batang tarik merupakan sistem yang terdapat pada struktur baja yang paling efisien dalam memanfaatkan kekuatan material untuk memikul beban, semakin tinggi mutu baja yang digunakan maka semakin kuat struktur tersebut (Dewobroto, 2016). Batang tarik sering dijumpai berupa batang sekunder seperti batang untuk memperkaku sistem lantai rangka batang atau untuk penumpu antara pada sistem dinding berusuk. Batang ini juga dapat berbentuk profil tunggal atau dibuat dari profil struktural (Salmon & Johnson, 1997).

2.6.1 Tahanan Nominal

Tahanan nominal pada batang tarik harus diperiksa terhadap tiga macam kondisi keruntuhan yang menentukan, yaitu: (Setiawan, 2013)

1. Leleh dari luas penampang kotor, di daerah yang jauh dari sambungan
2. Fraktur dari luas penampang efektif pada daerah sambungan

3. Geser blok pada sambungan

Mengacu pada SNI 1729:2020 menyatakan bahwa semua komponen struktur yang memikul gaya tarik aksial terfaktor sebesar T_n maka harus memenuhi:

$$P_u \leq \phi \cdot P_n \quad (2.47)$$

Keterangan:

ϕ = faktor resistensi (reduksi tahanan)

P_n = tahanan nominal

P_u = gaya tarik aksial terfaktor

Besarnya tahanan nominal (T_n) suatu batang tarik untuk tipe keruntuhan leleh dan fraktur dapat ditentukan sebagai berikut:

1. Kondisi Leleh dari Luas Penampang Kotor

Persamaan yang digunakan ketika kondisi leleh yang menentukan ialah sebagai berikut:

$$P_n = A_g \cdot f_y \quad (2.48)$$

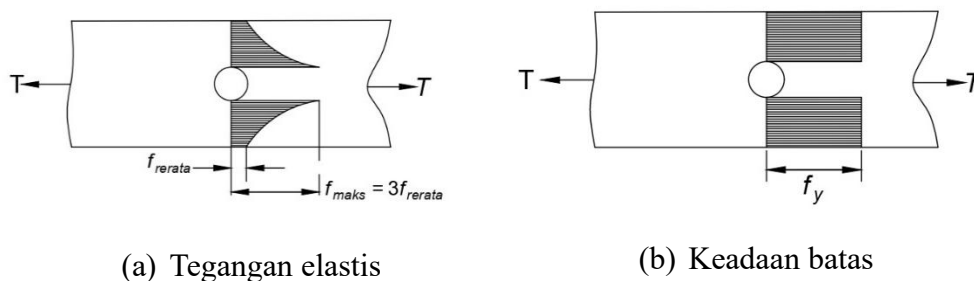
Keterangan:

A_g = luas penampang kotor, mm^2

f_y = kuat leleh material, MPa

2. Kondisi Fraktur dari Luas Penampang Kotor

Lubang yang terdapat pada batang tarik akibat penempatan sambungan baut, maka luas penampangnya akan tereduksi dan dinamakan luas netto (A_n). Distribusi tegangan akibat adanya lubang pada penampang dapat dilihat pada Gambar 2.7 sebagai berikut.



Gambar 2.6 Distribusi Tegangan Akibat Adanya Lubang pada Penampang
(Sumber: Setiawan, 2013)

Bila kondisi fraktur pada sambungan yang menentukan, maka rumus tahanan nominal (T_n) dari batang tarik tersebut ialah:

$$P_n = A_e \cdot f_u \quad (2.49)$$

Keterangan:

A_e = luas penampang efektif = $U \cdot A_n$

U = koefisien reduksi

f_u = tegangan tarik putus, MPa

Untuk nilai faktor tahanan (ϕ):

$\phi = 0,90$ untuk kondisi leleh, dan

$\phi = 0,75$ untuk kondisi fraktur

2.6.2 Luas Netto

Luas netto merupakan lubang yang dibuat pada sambungan untuk menempatkan alat penguat seperti baut atau paku keling. Adanya lubang tersebut dapat mengurangi luas penampang sehingga mengurangi tahanan pada penampang tersebut. Berdasarkan SNI 1729:2020 mengenai perlubangan untuk baut, bahwa lubang dapat dipotong dengan mesin pemotong api, dibor ukuran penuh, dan atau dipons 3 mm lebih kecil dan kemudian diperbesar atau dipons penuh. Material yang dipons harus memenuhi kriteria material dengan tegangan leleh (f_y) tidak lebih dari 360 Mpa dan memiliki ketebalan tidak lebih $5600/f_y$ mm.

Diameter nominal suatu lubang baut yang sudah jadi harus 2 mm lebih besar dari diameter nominal baut untuk suatu baut yang diameternya tidak lebih dari 24 mm. Untuk baut yang memiliki diameter lebih dari 24 mm, maka ukuran lubang harus diambil 3 mm lebih besar. Luas netto penampang tarik tidak boleh diambil lebih besar daripada 85% luas bruttonya.

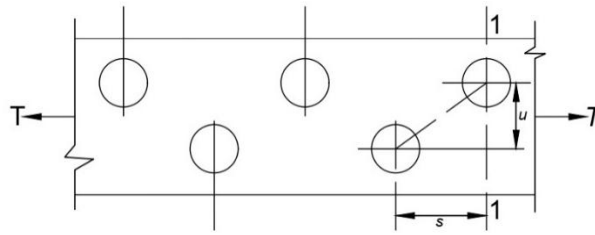
$$A_n \leq 0,85A_g \quad (2.50)$$

Keterangan:

A_g = luas penampang kotor, mm^2

A_n = luas netto penampang, mm^2

Lubang baut yang diletakan secara berseling (Gambar 2.7) dalam diatur dengan perhitungan sebagai berikut:



Gambar 2.7 Keruntuhan Potongan 1-1 dan 1-2
(Sumber: Setiawan, 2013)

Dari potongan 1-1 diperoleh . $A_n = A_g - ndt$. (2.51)

Potongan 1-2 $A_n = A_g - ndt + \sum \frac{s^2 t}{4u}$ (2.52)

Keterangan:

A_g = luas penampang kotor, mm^2

A_n = luas netto penampang, mm^2

t = tebal penampang

d = diameter lubang

n = banyak lubang dalam satu potongan

s, u = jarak antar sumbu lubang pada arah sejajar dan tegak lurus sumbu komponen struktur

2.6.3 Luas Netto Efektif

Shear lag merupakan kondisi di mana suatu komponen struktur tarik hanya disambung sebagian saja, contohnya pada profil siku (Gambar 2.8). salah satu cara dalam mengatasi *shear lag* adalah dengan memperpanjang sambungan, masalah ini dalam perhitungan diantisipasi dengan luas netto efektif , yang diterapkan pada sambungan baut ataupun las. Dalam SNI 1729:2020 Pasal D3 mengatur persamaan luas netto efektif komponen struktur yang mengalami gaya tarik, dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$A_e = U \times A_n \quad (2.53)$$

Keterangan:

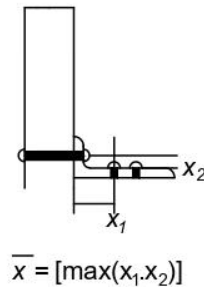
A_e = luas efektif penampang

A_n = luas netto penampang, mm^2

U = koefisien reduksi = $1 - \bar{x}/L < 0,9$

$\bar{x}$ = eksentrisitas sambungan

L = panjang sambungan dalam arah gaya tarik



Gambar 2.8 Nilai $\bar{x}$ untuk Profil Siku
(Sumber: Setiawan, 2013)

Apabila gaya tarik disalurkan dengan menggunakan alat sambung las, maka 3 kondisi yang akan dijumpai yaitu:

1. Bila gaya tarik disalurkan hanya oleh las memanjang ke elemen bukan pelat, atau oleh kombinasi las memanjang dan melintang maka:

$$A_e = A_g \quad (2.54)$$

2. Bila gaya tarik disalurkan oleh las melintang saja:

A_e luas penampang yang disambung las ($U = 1$)

3. Bila gaya tarik disalurkan ke elemen pelat oleh las memanjang sepanjang kedua sisi bagian ujung elemen:

$$A_e = U \cdot A_g \quad (2.55)$$

Dengan:

L = panjang las

w = jarak antar las memanjang (lebar pelat)

$$U = U = \frac{3t^2}{3t^2 + w^2} \left(1 - \frac{\bar{x}}{l} \right)$$

2.6.4 Geser Blok (*Block Shear*)

Geser blok (*block shear*) adalah kondisi pada sebuah elemen pelat tipis yang menerima beban tarik, dan disambungkan dengan alat penguat dan tahanan dari komponen tarik tersebut dapat ditentukan oleh kondisi batas sobek. Keruntuhan geser blok merupakan penjumlahan tarik leleh (atau tarik fraktur) pada satu irisan

dengan fraktur (atau geser leleh) pada irisan lainnya yang saling tegak lurus. Tahanan nominal tarik dalam keruntuhan geser blok diberikan oleh persamaan:

1. Geser leleh – Tarik Fraktur ($f_u \cdot A_{nt} \geq 0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv}$)

$$P_u = 0,06 \cdot f_y \cdot A_{gv} + f_u A_{nt} \quad (2.56)$$

2. Geser fraktur – Tarik leleh ($f_u \cdot A_{nt} < 0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv}$)

$$P_u = 0,06 \cdot f_y \cdot A_{uv} + f_u A_{nt} \quad (2.57)$$

Keterangan:

A_{gv} = luas kotor akibat geser

A_{gt} = luas kotor akibat tarik

A_{uv} = luas netto akibat geser

A_{nt} = luas netto akibat tarik

f_u = kuat tarik

f_y = kuat leleh

2.6.5 Kelangsingan Struktur Tarik

Suatu komponen struktur tarik harus memenuhi syarat kekakuan untuk mengurangi problem yang terkait dengan lendutan dan vibrasi. Syarat kekakuan ini berdasarkan pada rasio kelangsingan ($\lambda = L/r$). Dengan λ adalah angka kelangsingan struktur, dan L adalah panjang komponen struktur, dengan r adalah jari-jari girasi ($r = \sqrt{\frac{I}{A}}$). Nilai λ diambil maksimum 240 untuk batang tarik utama, dan 300 untuk batang tarik sekunder (Setiawan, 2013).

2.7 Desain Batang Tekan

Batang tekan ditujukan untuk komponen struktur yang memikul beban tekan sentris tepat pada titik berat penampang, atau kolom dengan gaya aksial saja (Dewobroto, 2016). Komponen struktur batang tekan dapat terdiri dari profil tunggal atau profil tersusun yang digabung dengan menggunakan pelat kopel. Pada komponen-komponen tekan yang langsing terdapat bahaya tekuk (*buckling*), sehingga diperlukannya syarat kestabilan dalam mendesain komponen struktur tersebut.

2.7.1 Tekuk Elastik Euler

Tekuk lentur atau tekuk euler adalah jenis keruntuhan tekuk yang terjadi karena adanya elemen yang mendapat lentur yang mengakibatkan kolom menjadi tidak stabil. Teori tekuk pertama kali diperkenalkan oleh Leonardo Euler pada tahun 1744. Komponen struktur yang dibebani secara konsentris, di mana seluruh bahan masih dalam kondisi elastik hingga terjadinya tekuk, kemudian perlahan-lahan akan melengkung. Pendekatan euler umumnya tidak digunakan untuk perencanaan karena hasil percobaan tidak sesuai dengannya (Setiawan, 2013).

2.7.2 Kekuatan Kolom Dasar

Penentuan kekuatan kolom dasar perlu diidealisir dengan beranggapan kondisi kolom sebagai berikut:

1. Kurva hubungan tegangan-regangan tekan yang sama di seluruh penampang.
2. Tidak ada tegangan sisa.
3. Kolom benar-benar lurus dan prismatis.
4. Beban bekerja pada titik berat penampang, hingga batang melentur.
5. Kondisi tumpuan harus ditentukan secara pasti.
6. Berlakunya teori lendutan kecil (*small deflection theory*).
7. Tidak ada puntir pada penampang selama terjadi lentur.

Dengan asumsi-asumsi di atas maka kekuatan kolom dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$F_{cr} = \frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \quad (2.58)$$

Keterangan:

P/A = tegangan rata-rata pada penampang

E_t = moduls tangen pada tegangan P/A

KL/r = angka kelangsingan efektif (ujung sendi ekuivalen)

Berdasarkan persyaratan kekuatan dan resistensi LRFD:

$$\phi_c P_n = 0,9 A_g F_{cr} \quad (2.59)$$

Keterangan:

P_n = kekuatan nominal (kg)

P_u = beban layan terfaktor (kg)

ϕ_c = faktor reduksi kuat aksial tekan = 0,85

Nilai kekuatan nominal dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\phi_c P_n = 0,9 A_g F_{cr} \quad (2.60)$$

Keterangan:

P_n = kekuatan nominal batang tekan yang dibebani secara aksial

F_{cr} = tegangan kritis pada kondisi tekan (kg/cm²)

A_g = luas penampang kotor (cm²)

2.7.3 Tahanan Tekan Nominal

Berdasarkan SNI 1729:2020 pasal E1, suatu struktur yang mengalami gaya tekan konsentris akibat beban terfaktor, N_u harus memenuhi kriteria:

$$N_u \leq \phi_c N_n \quad (2.61)$$

Keterangan:

N_n = kuat tekan nominal komponen struktur (kg) = $A_g \cdot f_{cr}$

N_u = beban layan terfaktor (kg)

ϕ_c = 0,90

Tegangan kritis untuk daerah elastis, ditulis sebagai:

$$\frac{f_{cr}}{f_y} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_c^2 f_y} = \frac{1}{\lambda_c^2} \quad (2.62)$$

$$\text{Sehingga, } \lambda_c = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (2.63)$$

Daya dukung nominal N_u struktur tekan dihitung sebagai berikut:

$$N_u = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega} \quad (2.64)$$

Dengan besarnya ω ditentukan oleh λ_c , yaitu:

$$\text{Untuk } \lambda_c < 0,25 \quad \text{maka } \omega = 1 \quad (2.65)$$

$$\text{Untuk } 0,25 < \lambda_c < 1,2 \quad \text{maka } \omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_c} \quad (2.66)$$

$$\text{Untuk } \lambda_c < 1,2 \quad \text{maka } \omega = 1,25 \lambda_c^2 \quad (2.67)$$

Keterangan:

λ_c = parameter kerampingan untuk kolom

λ = rasio kerampingan untuk elemen-elemen pelat

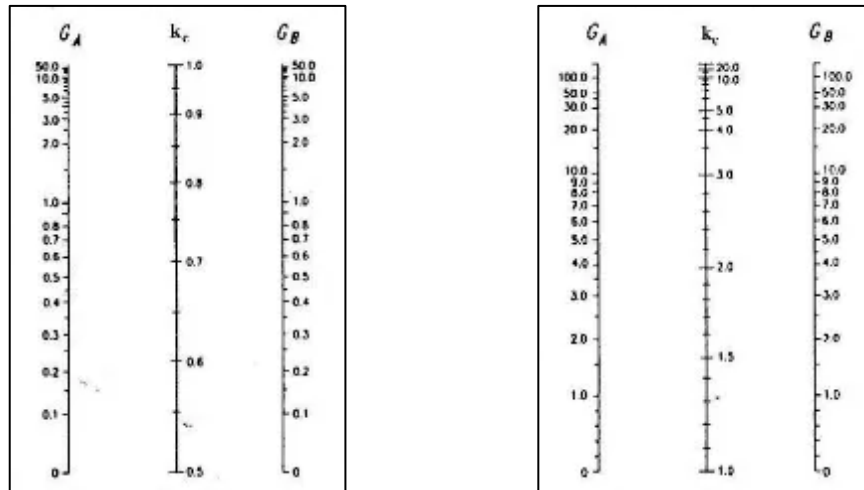
2.7.4 Panjang Tekuk Kolom

Garis terputus menunjukkan diagram kolom tertekuk	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Nilai λ_c teoritis	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Nilai λ_c yang dianjurkan untuk kolom yang mendekati kondisi idill	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Kode ujung	 Jepit  Sendi  Roll tanpa putaran sudut  Ujung bebas					

Gambar 2.9 Panjang Tekuk untuk Beberapa Kondisi Perletakan
(Sumber: Arifi & Setyowulan, 2021)

Suatu komponen struktur tekan dapat menerima besar beban yang tergantung berdasarkan panjang efektifnya, semakin kecil panjang efektif suatu komponen struktur tekan, maka semakin kecil pula risiko terhadap masalah tekuk. Panjang efektif suatu kolom adalah jarak di antara dua titik pada kolom tersebut yang mempunyai momen sama dengan nol, atau dapat diartikan juga sebagai jarak di antara dua titik belok dari kelengkungan kolom. Dalam tahap perhitungan kelangsingan komponen struktur tekan ($\lambda = L/r$), panjang komponen struktur yang digunakan dikalikan dengan suatu faktor panjang tekuk (k) untuk memperoleh panjang efektif dari kolom tersebut. Besarnya faktor panjang efektif tergantung dari kondisi perletakan pada ujung-ujung komponen struktur tersebut (Arifi & Setyowulan, 2021a).

Berdasarkan SNI juga memberikan nilai faktor panjang tekuk sebagai kondisi tumpuan ujung dari suatu kolom. Gambar 2.9 Merupakan nilai k untuk kondisi tumpuan ujung yang ideal. Sedangkan untuk komponen struktur tekan yang merupakan bagian dari suatu struktur portal kaku, nilai k ditentukan dengan suatu nomogram yang dapat dilihat pada Gambar 2.10.



(a) Komponen struktur tak-bergoyang (b) Komponen struktur bergoyang

Gambar 2.10 Nomogram Faktor Panjang Tekuk, k
(Sumber: Arifi & Setyowulan, 2021)

Berdasarkan nomogram tersebut, nilai k merupakan fungsi dari G_A dan G_B yang merupakan perbandingan antara kekakuan komponen struktur yang dominan terhadap tekan (kolom) dengan kekakuan komponen struktur yang relatif bebas terhadap gaya tekan (balok), nilai G ditetapkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$G = \frac{\sum \left(\frac{I}{L} \right)_{\text{kolom}}}{\sum \left(\frac{I}{L} \right)_{\text{balok}}} \quad (2.68)$$

Keterangan:

I = momen kelembaman kolom/balok (cm^4)

L = panjang kolom/balok (cm)

Nilai k kemudian digunakan untuk menghitung panjang efektif kolom dengan persamaan sebagai berikut:

$$L_e = k \times L \quad (2.69)$$

Keterangan:

L_e = panjang efektif kolom (cm)

k = faktor panjang efektif

L = panjang kolom/balok (cm)

2.8 Komponen Struktur Lentur

Balok merupakan suatu komponen struktur yang dapat memikul beban-beban gravitasi, seperti beban mati dan beban hidup. Balok ini merupakan kombinasi dari elemen tekan dan elemen tarik. Tegangan lentur pada penampang profil yang mempunyai minimal satu sumbu simetris, dan dibebani pada pusat gesernya, dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$f = \frac{M_x}{S_x} + \frac{M_y}{S_y} \quad (2.70)$$

$$\text{Dengan } S_x = \frac{I_x}{c_y} \text{ dan } S_y = \frac{I_y}{c_x} \quad (2.71)$$

$$\text{Sehingga } f = \frac{M_x \cdot c_y}{I_x} + \frac{M_y \cdot c_x}{I_y} \quad (2.72)$$

Keterangan:

f = tegangan lentur

I_x, I_y = momen inersia arah x dan y

M_x, M_y = momen lentur arah x dan y

S_x, S_y = moduls penampang arah x dan y

c_x, c_y = jarak titik berat ke tepi serat arah x dan y

2.8.1 Perilaku Balok Terkekang Lateral

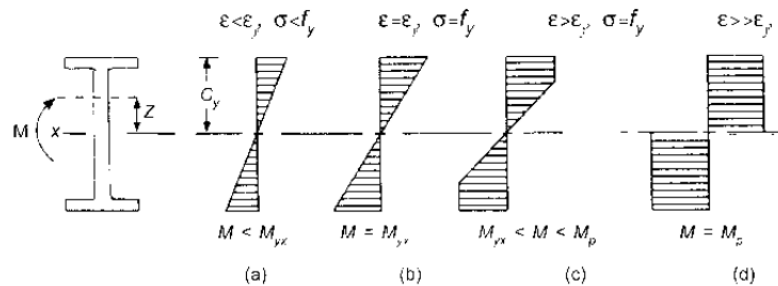
Distribusi tegangan pada penampang WF yang diakibatkan oleh momen lentur dapat dilihat pada Gambar 2.11, Pada kondisi elastik berlangsung hingga tegangan pada serat terluar mencapai kuat lelehnya (f_y) setelah mencapai regangan leleh (ϵ_y), regangan akan terus meningkat tanpa diikuti kenaikan tegangan, hal tersebut didasari pada kurva tegangan-regangan material baja. Pada kondisi kuat leleh tercapai pada serat terluar, tahanan momen nominal sama dengan momen leleh (M_{yx}) dengan besarnya adalah:

$$M_n = M_{yx} = S_x \cdot f_y \quad (2.73)$$

Pada saat kondisi akhir tercapai semua serat dalam penampang melampaui regangan lelehnya, dan dinamakan sebagai kondisi plastis. Tahanan momen

nominal dalam kondisi ini disebut dengan momen plastis (M_p) besarnya dihitung dengan persamaan:

$$M_p = f_y \cdot \int_A y \cdot dA = f_y Z \quad (2.74)$$



Gambar 2.11 Distribusi Tegangan pada Level Beban Berbeda
(Sumber: Setiawan, 2013)

2.8.2 Desain Balok Terkekang Lateral

Berdasarkan konsep LRFD, tahanan balok harus memenuhi persyaratan persamaan sebagai berikut:

$$\phi_b \cdot M_n > M_u \quad (2.75)$$

Keterangan:

$$\phi_b = 0,90$$

M_n = tahanan momen nominal

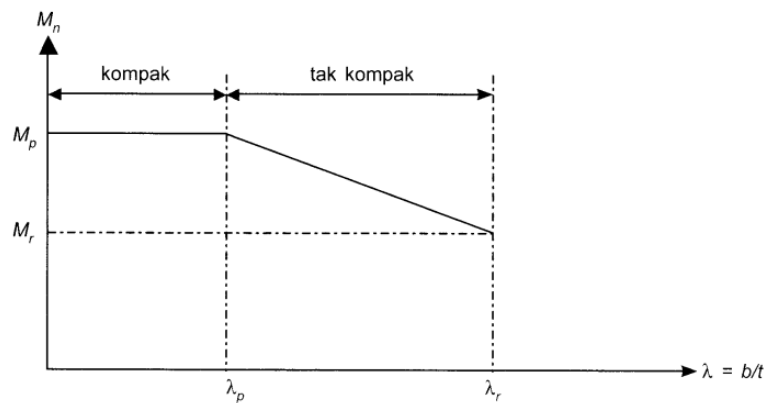
M_u = momen lentur akibat beban terfaktor

Perhitungan tahanan momen nominal dibedakan antara penampang kompak, tak kompak, dan langsing. Berikut batasannya:

Penampang kompak $= \lambda < \lambda_p$

Penampang tak kompak $= \lambda_p < \lambda < \lambda_r$

Langsing $= \lambda > \lambda_r$



Gambar 2.12 Tahanan Momen Nominal Penampang Kompak dan Tak Kompak
(Sumber: Setiawan, 2013)

1. Penampang kompak

Tahanan momen nominal terkekang lateral dengan penampang kompak menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$M_n = M_p = Z \cdot f_y \quad (2.76)$$

Keterangan:

M_p = tahanan momen plastis

Z = tegangan sisa

f_y = kuat leleh

2. Penampang tak kompak

Tahanan momen nominal pada saat $\lambda = \lambda_r$ atau penampang tak kompak menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$M_n = M_r = (f_y - f_r) \cdot S \quad (2.77)$$

Keterangan:

f_y = tahanan leleh

f_r = tegangan sisa (70 MPa untuk penampang gelas panas dan 115 MPa untuk penampang yang dilas)

S = moduls penampang

Untuk penampang tak kompak yang mempunyai $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, maka besarnya tahanan nominal dicari dengan melakukan interpolasi linear, dengan persamaan:

$$M_n = \frac{\lambda_r - \lambda}{\lambda_r - \lambda_p} M_p + \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} M_r \quad (2.78)$$

Keterangan:

λ = kelangsingan penampang balok ($= b / 2t_f$)

λ_r, λ_p = dapat dilihat pada tabel 7.5-1 peraturan baja (Tabel 2.17 dan Tabel 2.18)

Tabel 2.17 Batasan Rasio Kelangsingan (λ_p) untuk Penampang Kompak

Tegangan Leleh f_y (MPa)	Tekuk Lokal Flens $\frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{170}{\sqrt{f_y}}$	Tekuk Lokal Web $\frac{b}{t_w} = \frac{1680}{\sqrt{f_y}}$	Tekuk Torsi Lateral $\frac{L}{r_y} = \frac{790}{\sqrt{f_y}}$
210	11,73	115,93	54,52
240	10,97	108,44	50,99
250	10,75	106,25	49,96
290	9,98	98,65	46,39
410	8,4	82,97	39,02

(Sumber: Setiawan, 2013)

Tabel 2.18 Batasan Rasio Kelangsingan (λ_r) untuk Penampang Tidak Kompak

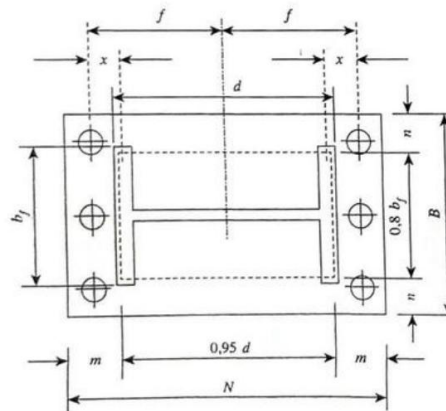
Tegangan Leleh f_y (MPa)	Tekuk Lokal Flens $\frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{370}{\sqrt{f_y - f_r}}$	Tekuk Lokal Web $\frac{h}{t_w} = \frac{2250}{\sqrt{f_y}}$
210	2,64	175,97
240	2,18	164,60
250	2,06	161,28
290	1,68	149,74
410	1,09	125,94

(Sumber: Setiawan, 2013)

2.9 Pelat Dasar (*Base Plate*)

Pelat dasar (*base plate*) dalam struktur bangunan baja merupakan sebuah tumpuan penghubung antara kolom struktur dengan pondasi. Struktur *base plate* terdiri dari suatu plat dasar, angkur serta sirip-sirip (*stiffner*). Suatu struktur *base plate* dan angkur harus memiliki kemampuan untuk mentransfer gaya geser, gaya aksial dan momen lentur ke pondasi. Konsep LRFD mendesain agar kuat rencana minimal sama atau lebih besar dari kuat perlu, yaitu momen lentur (M_u), gaya aksial

(P_u) dan gaya geser (V_u) untuk semua macam kombinasi pembebanan yang disyaratkan. Struktur *base plate* secara geometri dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Penampang *Base Plate* dan Notasi
(Sumber: Setiawan, 2013)

$$m = \frac{(N - 0,95d)}{2} \quad (2.79)$$

$$n = \frac{B - 0,8b_f}{2} \quad (2.80)$$

$$x = f - \frac{d}{2} + \frac{b_f}{2} \quad (2.81)$$

Keterangan:

B = lebar *base plate*

b_f = lebar sayap/flens kolom

N = panjang *base plate*

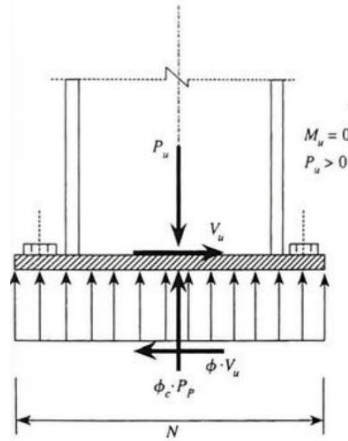
d = tinggi kolom

f = jarak angkur ke sumbu *base plate* dan sumbu kolom

Tinjauan desain *base plate* berdasarkan momen lentur yang bekerja terbagi menjadi empat kategori, di antaranya:

1. Kategori A (*base plate* tanpa momen lentur)

Kategori ini merupakan *base plate* berupa idealisasi tumpuan sendi yang tidak adanya beban momen lentur. Struktur *base plate* ini mampu memikul gaya geser dan aksial sehingga terjadinya distribusi tegangan yang merata di sepanjang bidang kontak antara *base plate* dengan beton penumpu. *Base plate* yang termasuk dalam kategori ini dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 *Base Plate* Kategori A
(Sumber: Setiawan, 2013)

Untuk memenuhi syarat kesetimbangan statis, reaksi tumpuan pada beton (P_p) harus sejaris dengan beban aksial yang bekerja

$$P_u \leq \phi_c \cdot P_p \quad (2.82)$$

$$P_p = 0,85 \cdot f'_c \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (2.83)$$

$$\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 2 \quad (2.84)$$

Keterangan:

$$\phi_c = 0,6$$

$$f'_c = \text{mutu kuat tekan beton, MPa}$$

$$A_2 = \text{luas penampang baja yang secara konsentris menumpu pada permukaan beton, mm}^2$$

$$A_1 = \text{luas maksimum bagian permukaan beton yang secara geometris sama dengan konsentris dengan daerah yang dibebani, mm}^2$$

Untuk *base plate* kategori A maka,

$$A_1 = B \cdot N \quad (2.85)$$

Sehingga

$$P_u \leq (0,60)(0,85) \cdot f'_c \cdot B \cdot N \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (2.86)$$

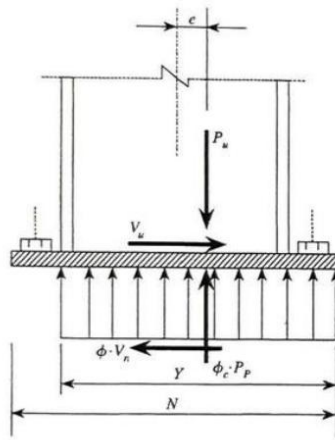
$$P_u \leq (0,60)(0,85) \cdot f'_c \cdot B \cdot N \cdot (2) \quad (2.87)$$

2. Kategori B

Kategori ini *base plate* memikul gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur dalam intensitas yang cukup kecil. Distribusi tegangan tidak terjadi di sepanjang *base plate* dan angkur yang terpasang berfungsi sebagai penahan gaya geser dan menjaga stabilitas struktur selama masa konstruksi. Jenis *base plate* ini dapat dilihat pada Gambar 2.15. Untuk kategori B, berlaku hubungan sebagai berikut:

$$A_1 = B \cdot Y \quad (2.88)$$

$$P_u \leq (0,60)(0,85) \cdot f'_c \cdot B \cdot Y \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq (0,60)(0,85) \cdot f'_c \cdot B \cdot Y \cdot (2) \quad (2.89)$$



Gambar 2.15 Base Plate Kategori B
(Sumber: Setiawan, 2013)

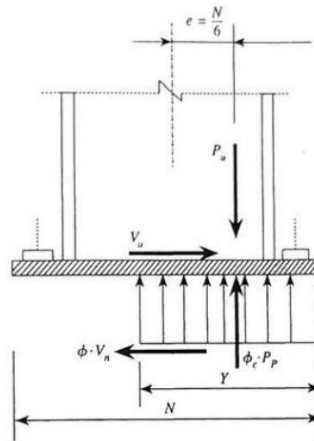
3. Kategori C

Kondisi *base plate* pada kategori ini terjadinya intensitas momen lentur makin meningkat, dan berada pada batas elastisnya karena penambahan sedikit intensitas momen lentur saja mengakibatkan pengangkatan atau *uplift base plate* terhadap beton penumpu. Kategori ini dapat dilihat pada Gambar 2.16. dan berlaku hubungan sebagai berikut:

$$A_1 = B \cdot Y \quad (2.90)$$

$$P_u \leq (0,60)(0,85) \cdot f'_c \cdot B \cdot Y \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq (0,60)(0,85) \cdot f'_c \cdot B \cdot Y \cdot (2) \quad (2.91)$$

$$P_u \leq (0,60)(0,85) \cdot f'_c \cdot B \cdot \left(\frac{2}{3}N\right) \cdot \sqrt{\frac{A_2}{B \left(\frac{2N}{3}\right)}} \leq (1,02) \cdot f'_c \cdot B \cdot Y \cdot \left(\frac{2}{3}N\right) \quad (2.92)$$

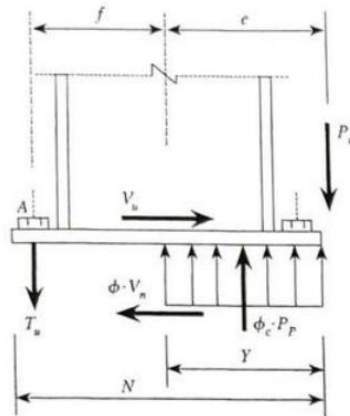


Gambar 2.16 *Base Plate* Kategori C
(Sumber: Setiawan, 2013)

4. Kategori D

Kategori ini sering dijumpai dalam perencanaan, terutama untuk portal kaku yang direncanakan untuk memikul gaya gempa lateral atau gaya akibat tiupan angin. Umumnya pada kategori *base plate* ini harus disertai dengan proses desain ukuran angkur yang digunakan. Dalam kasus ini terdapat dua variabel yang harus dihitung yaitu panjang Y dan gaya tarik pada angkur (T_u), maka:

$$P_u = \phi_c \cdot P_p = \phi_c \cdot 0,85 \cdot f'_c \cdot B \cdot Y \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} = q \cdot Y \quad (2.93)$$



Gambar 2.17 *Base Plate* Kategori D
Sumber: Setiawan, 2013

Perhitungan angkur pada suatu *base plate* direncanakan untuk memikul gaya geser dan tarik dengan syarat sebagai berikut:

$$V_{ub} \leq \phi \cdot F_v \cdot A_b \quad (2.94)$$

$$T_{ub} \leq \phi \cdot F_t \cdot A_b \quad (2.95)$$

Untuk angkur tipe A307:

$$F_t = 407 - 1,9f_v < 310 \quad (2.96)$$

$$F_v = 166 \text{ MPa} \quad (2.97)$$

Untuk tipe A325 dengan ulir di luar bidang geser:

$$F_t = 807 - 1,5f_v < 621 \quad (2.98)$$

$$F_v = 414 \text{ MPa} \quad (2.99)$$

Keterangan:

V_{ub} = gaya geser terfaktor pada angkur, N

ϕ = faktor tahanan pada angkur = 0,75

F_v = kuat geser nominal angkur, MPa

A_b = luas penampang angkur, mm²

T_{ub} = gaya tarik terfaktor pada angkur, N

F_t = kuat tarik nominal angkur, MPa

f_v = tegangan geser yang terjadi pada angkur

$$f_v = \frac{V_{ub}}{A_b}$$

Tebal *base plate* dilakukan seperti perencanaan struktur dengan syarat sebagai berikut:

$$M_{pl} \leq \phi_b \cdot M_n \quad (2.100)$$

$$M_n = M_p \quad (2.101)$$

Keterangan:

M_{pl} = momen lentur terfaktor yang terjadi pada *base plate*, N.mm

M_n = momen nominal *base plat*, N.mm

M_p = momen lentur plastis dari *base plate*, N.mm

2.10 Sambungan Struktur

Struktur baja merupakan gabungan dari beberapa komponen batang yang disambungkan dengan alat pengencang. Alat sambungan dalam struktur baja terdiri

dari paku keling (*rivet*), baut, dan las. Pada tahap perencanaan, pemilihan jenis sambungan akan mempengaruhi strategi analisis struktur yang dipilih, khususnya dalam menyiapkan pemodelan struktur. Selain itu terdapat juga sambungan yang dipilih mempengaruhi kekuatan, biaya, cara atau metode kerja dan waktu pelaksanaan (Dewobroto, 2016).

2.10.1 Sambungan Baut

Sambungan baut adalah sambungan yang sering kali digunakan dalam perencanaan struktur, seperti baut mutu tinggi. Sambungan baut mutu tinggi memiliki kelebihan seperti kemampuan menerima gaya lebih besar, dan secara keseluruhan dapat menghemat biaya konstruksi. Dua jenis dasar baut mutu tinggi yang distandarkan oleh ASTM adalah tipe A325 dan A490, baut ini memiliki bentuk kepala segi enam. Baut baja A325 terbuat dari baja karbon yang memiliki kuat leleh 560-630 MPa, sedangkan baut A490 terbuat dari baja alloy dengan kuat leleh 790-900 MPa. Baut mutu tinggi memiliki diameter berkisar antara $\frac{1}{2}$ dan $\frac{7}{8}$ in, ukuran yang sering digunakan dalam struktur bangunan adalah $\frac{3}{4}$ dan $\frac{7}{8}$ in. Berikut uraian dari jenis baut pada Tabel 2.19.

Tabel 2.19 Tipe-Tipe Baut

Tipe Baut	Diameter (mm)	<i>Proof Stress</i> (MPa)	Kuat Tarik Min (MPa)
A307	6.35 - 104	-	60
A325	12.7- 25.4	585	825
	28.6 – 38.1	510	725
A490	12.7-38.1	825	1035

(Sumber: Sumber: Setiawan, 2013)

Sesuai persyaratan LRFD, suatu baur yang memikul beban terfaktor (R_u) harus memenuhi:

$$R_u \leq \phi \cdot R_n \quad (2.102)$$

R_n adalah tahanan nominal baut sedangkan ϕ adalah faktor reduksi yang diambil sebesar 0,75. Besarnya R_n berbeda-beda untuk masing-masing tipe sambungan.

1. Tahanan geser baut

Tahanan nominal satu buah baut yang memikul gaya geser memenuhi persamaan:

$$R_n = m \cdot r_1 \cdot f_u^b \cdot A_b \quad (2.103)$$

Keterangan:

$r_1 = 0,50$ untuk baut tanpa ulir pada bidang geser
 $= 0,40$ untuk baut dengan ulir pada bidang geser

f_u^b = kuat tarik baut (MPa)

A_b = luas bruto penampang baut pada daerah tak berulir

m = jumlah bidang geser

2. Tahanan tarik baut

Baut yang memikul gaya tarik tahanan nominalnya dihitung dengan persamaan:

$$R_n = 0,75 \cdot f_u^b \cdot A_b \quad (2.104)$$

Keterangan:

f_u^b = kuat tarik baut (MPa)

A_b = luas bruto penampang baut pada daerah tak berulir

3. Tahanan tumpu baut

Tahanan tumpu nominal tergantung kondisi yang terlemah dari baut atau komponen pelat yang disambung. Besarnya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$R_n = 2,4 \cdot d_b \cdot t_p \cdot f_u \quad (2.105)$$

Keterangan:

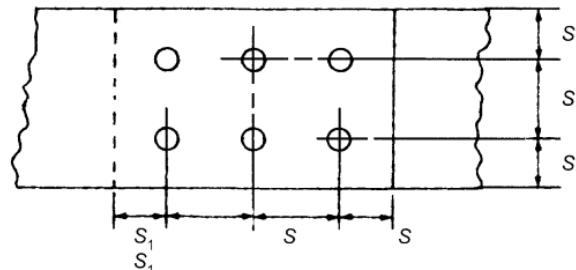
d_b = diameter baut pada daerah tak berulir

t_p = tebal pelat

f_u = kuat tarik putus terendah dari baut atau pelat

Berdasarkan SNI 03-1729-2002 pasal 13.4 jarak antar pusat lubang baut harus di ambil tidak kurang dari 3 kali diameter nominal baut, dan jarak antara baut tepi dengan ujung pelat harus sekurang-kurangnya 1,5 diameter baut. Dan jarak maksimum antar pusat lubang baut tidak melebihi $15 t_p$ (t_p merupakan tebal pelat

lapis tertipis dalam sambungan) atau 200 mm, sedangkan jarak tepi maksimum tidak melebihi $(4 t_p + 100 \text{ mm})$ atau 200 mm.



Gambar 2.18 Tata Letak Baut
(Sumber: Setiawan, 2013)

Perencanaan sambungan yang memikul kombinasi geser dan tarik, terdapat dua persyaratan yang harus dipenuhi:

$$1. \quad f_{nv} = \frac{V_u}{n \cdot A_b} \leq 0,5 \cdot \begin{cases} 0,5 \cdot \phi \cdot f_u^b \cdot m \\ 0,4 \cdot \phi \cdot f_u^b \cdot m \end{cases} \quad (2.106)$$

$$2. \quad \phi \cdot R_{nt} = \phi \cdot f_t \cdot A_b > \frac{T_u}{n} \quad (2.107)$$

Keterangan:

$0,5 \cdot \phi \cdot f_u^b \cdot m$ = tanpa ulir di bidang geser

$0,4 \cdot \phi \cdot f_u^b \cdot m$ = dengan ulir di bidang geser

2.10.2 Sambungan Las

Proses pengelasan merupakan suatu teknik penyambungan bahan logam yang menghasilkan peleburan bahan dengan memanaskannya hingga suhu tepat dengan atau tanpa pemberian tekanan dan dengan atau tanpa pemakaian bahan pengisi. Jenis-jenis las terdiri dari:

1. Las tumpul (*groove welds*)

Jenis las ini digunakan untuk menyambungkan batang-batang sebidang, prinsip pada jenis las ini yaitu menyalurkan secara penuh beban yang bekerja maka las ini harus memiliki kekuatan yang sama dengan batang yang disambungannya.

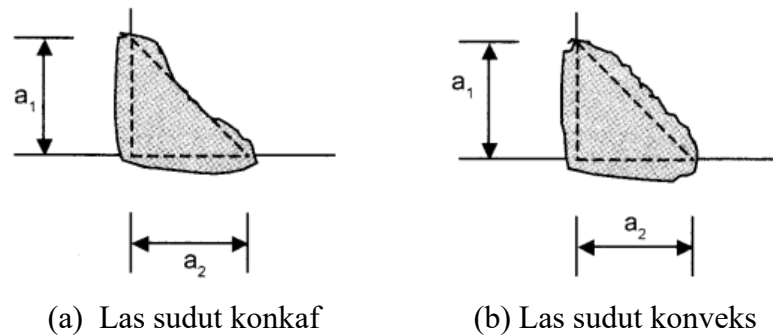
2. Las sudut (*fillet welds*)

Penggunaan tipe las ini paling banyak digunakan dalam proses pengelasan suatu konstruksi. 80% sambungan las menggunakan tipe las sudut. Dalam pengerjaan las jenis ini tidak memerlukan presisi tinggi dalam pengerjaannya.

3. Las baji dan pasak (*slot dan plug welds*)

Jenis las ini biasanya digunakan secara bersama dengan jenis las sudut. Manfaat utama yang dihasilkan adalah menyalurkan gaya geser pada sambungan lewatan bila ukuran panjang las terbatas oleh panjang yang tersedia untuk las sudut.

2.10.2.1 Pembatasan Ukuran Las Sudut



Gambar 2.19 Ukuran Las Sudut
(Sumber: Setiawan, 2013)

Ukuran dalam jenis las sudut ditentukan oleh panjang kaki yang ditentukan sebagai panjang a_1 dan a_2 (Gambar 2.19). Bila kakinya memiliki ukuran sama panjang maka dinamakan t_w . Pada Tabel 2.20 terdapat ukuran las sudut minimum yang ditetapkan.

Tabel 2.20 Ukuran Minimum Las Sudut

Tebal pelat (t , mm) paling tebal	Ukuran minimum las sudut (a , mm)
$t \leq 7$	3
$7 < t \leq 10$	4
$10 < t \leq 15$	5
$15 < t$	6

(Sumber: Sumber: Setiawan, 2013)

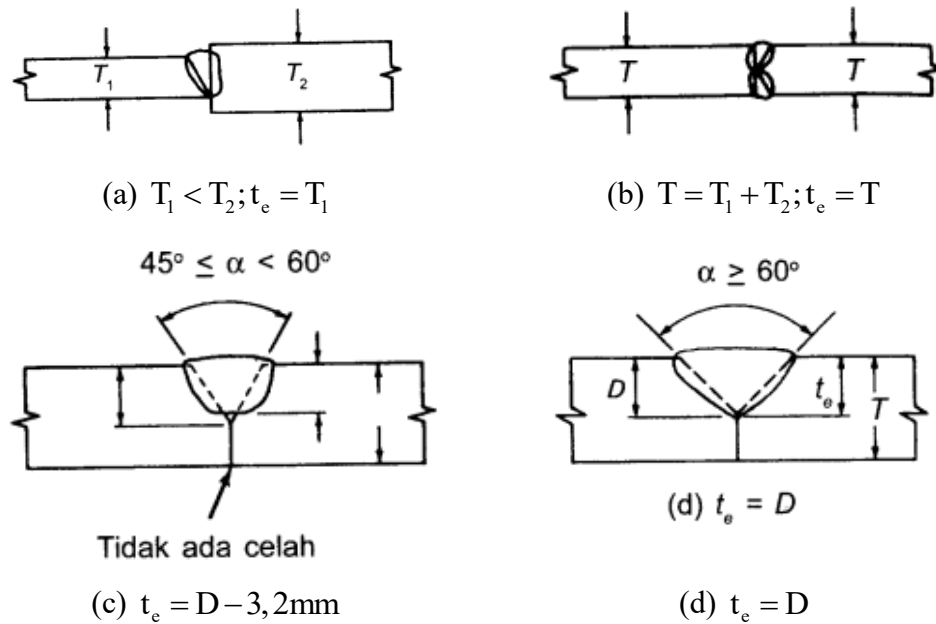
2.10.2.2 Luas Efektif Las

Luas efektif dari jenis las sudut dan las tumpul adalah hasil perkalian antara tebal efektif (t_e) dengan panjang las. Tebal efektif las tergantung dari ukuran dan bentuk dari las tersebut dan dapat dianggap sebagai lebar minimum dari bidang keruntuhan.

1. Las Tumpul

Tebal efektif pada las tumpul penetrasi penuh adalah tebal pelat yang tertipis

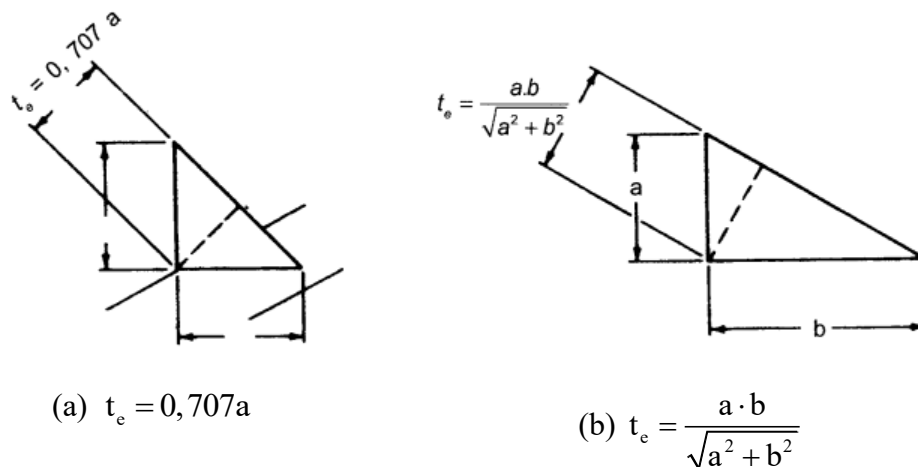
dari komponen yang disambung. Las penetrasi sebagian dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Tebal Efektif Las Tumpul
(Sumber: Setiawan, 2013)

2. Las Sudut

Tebal efektif dari jenis las sudut ini diambil dengan nominal terkecil dari kemiringan las dengan titik sudut di depannya. Asumsikan las sudut ini mempunyai ukuran kaki yang sama (a), maka tebal efektif bernilai $0,707a$. Jika ukuran memiliki las yang tidak sama panjang, maka tebal efektif dihitung dengan memakai hukum-hukum trigonometri (Gambar 2.21)



Gambar 2.21 Tebal Efektif Las Sudut
(Sumber: Setiawan, 2013)

2.10.2.3 Tahanan Nominal Sambungan Las

Persyaratan LRFD untuk keamanan suatu struktur las adalah terpenuhinya persamaan:

$$\phi R_{nw} \geq R_u \quad (2.108)$$

Dengan:

ϕ = faktor tahanan

R_{nw} = tahanan nominal per satuan panjang

R_u = beban terfaktor per satuan panjang las

1. Las Tumpul

Tahanan nominal pada jenis las tumpul dapat ditentukan berdasarkan persamaan sebagai berikut:

1. Sambungan dibebani dengan gaya tarik atau gaya tekan aksial terhadap luas efektif persamaannya adalah:

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,90 \cdot t_e \cdot f_y \quad (\text{bahan dasar}) \quad (2.109)$$

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,90 \cdot t_e \cdot f_{yw} \quad (\text{las}) \quad (2.110)$$

2. Sambungan dibebani dengan gaya geser terhadap luas efektif persamaannya adalah:

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,90 \cdot t_e \cdot (0,6 \cdot f_y) \quad (\text{bahan dasar}) \quad (2.111)$$

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,90 \cdot t_e \cdot (0,6 \cdot f_{uw}) \quad (\text{las}) \quad (2.112)$$

Dengan f_y dan f_u merupakan kuat leleh baja dan tarik putus baja.

2. Las Sudut

Kuat rencana dalam jenis las sudut adalah per satuan panjang las sudut, dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,75 \cdot t_e \cdot (0,6 \cdot f_{uw}) \quad (\text{las sudut}) \quad (2.113)$$

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,75 \cdot t_e \cdot (0,6 \cdot f_u) \quad (\text{bahan dasar}) \quad (2.114)$$

3. Las Baji dan Pasak

Kuat rencana pada jenis las baji dan pasak ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,75 \cdot (0,6 \cdot f_{uw}) \cdot A_w \quad (2.115)$$

Keterangan:

A_w = luas geser efektif las

f_{uw} = kuat tarik putus logam las