

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Perencanaan

2.1.1 Struktur Baja

Struktur baja menjadi salah satu material yang banyak digunakan dalam pembangunan gedung. Baja merupakan material yang memiliki kekakuan dan kekuatan yang tinggi sehingga mampu menahan beban yang cukup besar. Baja memiliki kekakuan lebih tinggi jika dibandingkan tulangan besi. Akan tetapi, baja juga memiliki kelemahan seperti tidak tahan terhadap panas yang tinggi dan rentan korosi. Salah satu penggunaan baja untuk struktur atas bangunan dapat dijumpai pada bangunan kafe dan pabrik.

Baja dapat dikombinasikan dengan material lainnya, salah satunya beton. Kombinasi antara baja dan beton disebut dengan baja komposit. Baja komposit mempunyai struktur yang kuat dalam menopang beban sebuah gedung. Tetapi di Indonesia masih sedikit yang mengaplikasikan dalam pembangunan karena untuk menggunakan struktur baja diperlukan keterampilan khusus. Sehingga tidak bisa dikerjakan oleh sembarangan orang.

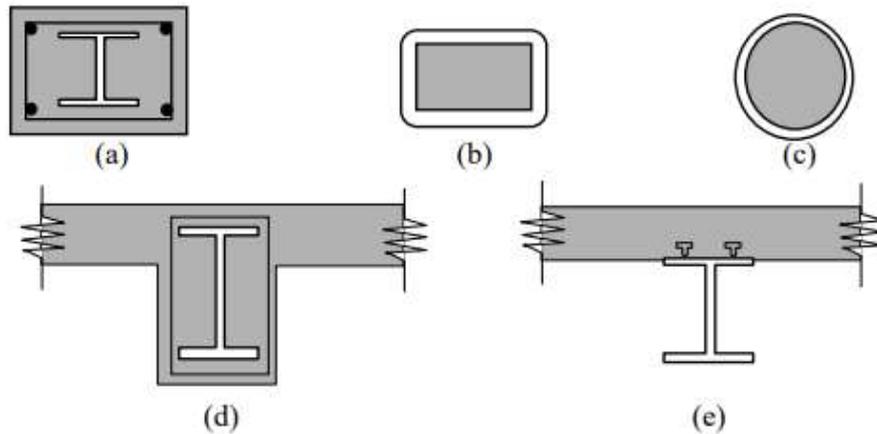
2.1.2 Struktur Komposit

Pada masa kini perkembangan teknologi pada bidang konstruksi semakin maju. Adanya peristiwa tersebut bertujuan untuk menciptakan sebuah struktur yang kuat, aman dan murah. Bentuk nyata aplikasinya yaitu berupa struktur komposit. Struktur komposit merupakan struktur yang mengkombinasikan dua material atau lebih dengan sifat yang berbeda untuk menciptakan satu komponen baru. Salah satu bangunan dengan struktur baja komposit yaitu struktur yang terdapat kombinasi antara baja dengan beton. Struktur baja komposit didasarkan atas kemampuan baja yang mampu menahan beban tekan dan tarik dengan baik. Meskipun demikian, tetap perlu diwaspadai akan bahaya tekuk ketika menerima beban tekan.

Melalui penggabungan kemampuan baja dan beton bertujuan untuk memperoleh masing-masing keunggulan dari kedua elemen tersebut. Pada akhirnya, diperoleh sebuah konstruksi yang kokoh, aman dan murah.

Secara umum struktur komposit berupa :

1. Kolom atau balok dengan profil baja yang terbungkus oleh beton (Gambar 2.1a dan 2.1d)
2. Kolom atau tiang pancang yang berisi beton (Gambar 2.1b dan 2.1c)
3. Balok dengan profil baja yang menahan slab beton (Gambar 2.1e)



Gambar 2. 1 Macam-Macam Struktur Komposit

Sumber : (Pujiyanto, 2014) 4. Struktur Komposit Dengan Metode LRFD

Hakikatnya lendutan pada struktur komposit lebih kecil jika dibandingkan dengan struktur non komposit. Peristiwa tersebut disebabkan karena momen inersia yang dimiliki struktur komposit lebih besar daripada struktur non komposit. Pada struktur komposit, beton yang telah mengeras akan mencapai momen inersia. Sedangkan momen inersia pada beton yang belum mengeras hanya diperoleh profil baja. Struktur komposit baja dan beton mempunyai keunggulan yaitu mampu mengurangi tingginya profil baja, mengurangi berat profil baja, dan meningkatkan kekakuan pada plat lantai yang direncanakan, serta menambah panjang bentang layan.

2.1.3 Metode Load Resistance and Factor Design (LRFD)

Load Resistance Factor Design (LRFD) merupakan metode perencanaan struktur baja yang mendasarkan perencanaan dengan membandingkan kekuatan struktur yang telah diberi suatu faktor resistensi (ϕ) terhadap kombinasi beban terfaktor yang direncanakan bekerja pada struktur tersebut ($\sum \gamma_i Q_i$).

A. Kondisi Batas

Kondisi batas ialah batas kemampuan suatu struktur supaya bisa diaplikasikan. Saat perencanaan harus membuat kondisi batas sangat kecil kemungkinan terlampauinya. Cara yang dapat dilakukan yaitu dengan memilih

kombinasi gaya, faktor tahanan dan nilai ketahanan yang tidak mungkin terlampaui berlandaskan pada kriteria perencanaan yang telah ada. Berikut ini dua jenis kondisi batas yang diterapkan pada struktur:

1. Kondisi batas kekuatan (*ultimate strength*), digunakan untuk menetapkan besarnya keamanan terhadap kondisi beban ekstrim sepanjang masa pakai struktur.
2. Kondisi batas layan, digunakan untuk menetapkan batasan-batasan agar struktur dapat berfungsi sesuai yang direncanakan.

Fokus perencanaan struktur LRFD adalah kondisi batas kekuatan (*limit states of strength*) yang mampu menjamin keselamatan publik (manusia dan barang miliknya). Untuk menerapkan kondisi batas pada perencanaan struktur, terdapat ketentuan LRFD yang pada dasarnya terdiri dari parameter-parameter berikut.

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

\sum = adalah penjumlahan

i = menunjukkan berbagai kondisi yang ditinjau

Q_i = pengaruh beban nominal

γ_i = faktor beban terkait beban Q_i yang ditinjau γ_i

Q_i = kuat perlu, dari kondisi batas yang paling ekstrim

R_n = kuat nominal, kekuatan elemen yang dihasilkan

ϕ = faktor tahanan sesuai jenis struktur yang ditinjau

ϕR_n = kuat rencana, kekuatan struktur yang direncanakan

B.Ketentuan LRFD – SNI 03-1729-2020 (Mengacu pada AISC 2010)

Perencanaan LRFD dikatakan memenuhi syarat apabila kuat perlu, R_u lebih kecil daripada kuat rencana, ϕR_u dengan ϕ adalah faktor tahanan yang nilainya bervariasi tergantung perilaku aksi komponen yang ditinjau. Konsep dasar ketentuan LRFD adalah :

$$R_u \leq \phi R_u \dots\dots\dots (2.2)$$

Kuat perlu, R_u merupakan nilai maksimum dari beragam kombinasi beban terfaktor yang dicari dengan berbantuan analisis struktur. Untuk mencari kuat perlu, R_u untuk tiap-tiap elemen struktur, maka dibutuhkan analisa struktur secara menyeluruh (global). Faktor kombinasi beban disiapkan untuk analisis struktur cara elastis. Apabila alat analisis struktur dilengkapi opsi memperhitungkan efek P- Δ (nonlinier geometri), maka ketentuan analisis stabilitas struktur selain memakai *Effective Length Method (ELM)* juga dapat memakai *Direct Analysis Method (DAM)*.

Hasil analisis struktur secara menyeluruh (global) untuk R_u seterusnya digunakan untuk mengevaluasi elemen-per-elemen dan dibandingkan dengan kuat rencana, ϕR_u yang ditinjau per-elemen juga, sesuai dengan gaya internal yang terjadi. Tinjauan per-elemen dibutuhkan karena karakter setiap aksi dan perilaku keruntuhannya bisa beragam.

Tabel 2. 1 Faktor tahanan ϕ

Komponen Struktur	Faktor Tahanan ϕ
Komponen struktur lentur	0,90
Komponen struktur tekan	0,90
Komponen struktur tarik	
• Kuat tarik untuk leleh tarik	0,90
• Kuat tarik untuk keruntuhan tarik	0,75
Sambungan baut	
• Baut yang memikul geser	0,75
• Baut yang memikul tarik	0,75
• Baut yang memikul kombinasi geser dan tarik	0,75
• Lapis yang memikul tumpu	0,75
Sambungan las	
• Las tumpul penetrasi penuh	0,90
• Las sudut dan las tumpul penetrasi sebagian	0,75
• Las pengisi	0,75

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2020b)

2.1.4 Struktur Bangunan Tahan Gempa

Gempa menjadi salah satu bencana alam yang sering terjadi di wilayah Indonesia. Titik gempa dan kekuatan gempa secara pasti belum mampu diketahui hingga kini. Bentuk antisipasi terhadap kemungkinan terjadinya gempa dapat dilakukan melalui perencanaan struktur bangunan tahan gempa. Perencanaan tersebut tidak berarti membuat sebuah bangunan yang tahan terhadap gempa. Melainkan untuk meminimalisir resiko terjadinya kecelakaan maupun kerugian sesudah gempa. Ketika merencanakan struktur bangunan tahan gempa diperlukan material yang berkekuatan tinggi, ringan, dan mudah pelaksanaannya. Material yang memiliki sifat-sifat tersebut yakni baja. Dengan begitu baja cocok untuk dijadikan sebagai material struktur bangunan tahan gempa.

Berdasarkan AISC (*American Institute of Steel Construction*) ada tipe bangunan dengan struktur tahan gempa yang berbeda-beda, antara lain :

A). *Ordinary Moment Frame (OMF)*

Sistem OMF (*Ordinary Moment Frame*) dapat digunakan pada bangunan yang mempunyai beban gravitasi yang lebih dominan. Sistem ini mempunyai deformasi inelastis dan tingkat daktilitasnya paling kecil namun mempunyai kekuatan yang besar. Ketika merencanakan sistem ini bisa mengabaikan syarat "*strong column weak beam*", dimana hal ini digunakan untuk merencanakan struktur yang mempunyai daktilitas tinggi. Sehingga sistem OMF cocok digunakan pada daerah yang memiliki gempa kecil.

B). *Intermediate Moment Frame (IMF)*

Sistem IMF (*Intermediate Moment Frame*) dalam perencanaannya menitikberatkan pada kegagalan struktur yang diakibatkan oleh keruntuhan geser. Sistem ini mampu bekerja inelastis akan tetapi terbatas. Dengan begitu, bangunan yang dapat mengaplikasikan sistem rangka ini biasanya adalah bangunan yang mempunyai resiko gempa yang relatif sedang.

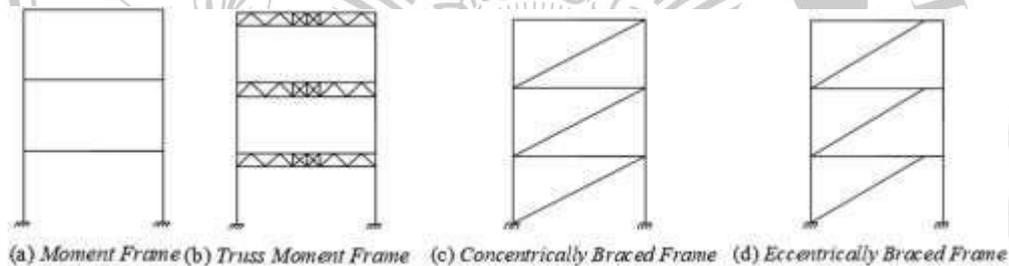
C). *Special Moment Frame (SMF)*

Sistem SMF (*Special Moment Frame*) harus dirancang secara khusus pada bagian yang akan terjadi sendi plastis. Hal ini dikarenakan sistem SMF harus mampu bekerja secara inelastis penuh. Sehingga bangunan tinggi yang akan menggunakan sistem SMF harus memenuhi *strong column weak beam*. Pada sistem

SMF, komponen struktur harus bisa memikul gaya akibat dari beban gempa dan direncanakan untuk memikul lentur. Komponen struktur tersebut juga harus memenuhi syarat di bawah ini :

- Gaya aksial tekan terfaktor pada komponen struktur tidak lebih dari $0,1A_g f_c'$
- Bentang bersih komponen struktur tidak boleh kurang dari 4x tinggi efektifnya
- Perbandingan antara lebar dan tinggi boleh kurang dari 0,3
- Lebarnya tidak boleh kurang dari 250 mm dan lebih dari lebar komponen struktur pendukung ditambah jarak pada tiap sisi komponen struktur pendukung yang tidak melebihi tiga perempat tinggi komponen struktur lentur

Secara umum, sistem SMF (*Special Moment Frame*) dipakai pada daerah yang mempunyai gempa yang relatif tinggi. Struktur yang direncanakan untuk kategori desain gempa D, E, dan F dimana rangka momen khusus disyaratkan pada SNI 1726:2019 tabel 12.



Gambar 2. 2 Tipe Struktur Rangka Baja

Sumber : (Lesmana, 2021)

D). *Special Truss Moment Frames (STMF)*

STMF (*Special Truss Moment Frames*) merupakan struktur rangka yang bisa berbentuk rangka batang vierendeel atau rangka diagonal sebagai elemen horizontalnya. Elemen yang terletak pada bagian horizontal akan dirancang supaya mampu berperilaku inelastis saat terjadinya gempa besar.

E). *Ordinary Concentrically Braced Frame (OCBF)*

Rangka OCBF (*Ordinary Concentrically Braced Frame*) merupakan rangka yang kaku yang disebut juga rangka tidak bergoyang. Hal ini dikarenakan pada elemen-elemen strukturnya mengandalkan perilaku aksial. Sistem ini, ketika terjadi gempa besar akan berperilaku elastis. Oleh karena itu, cocok jika digunakan pada

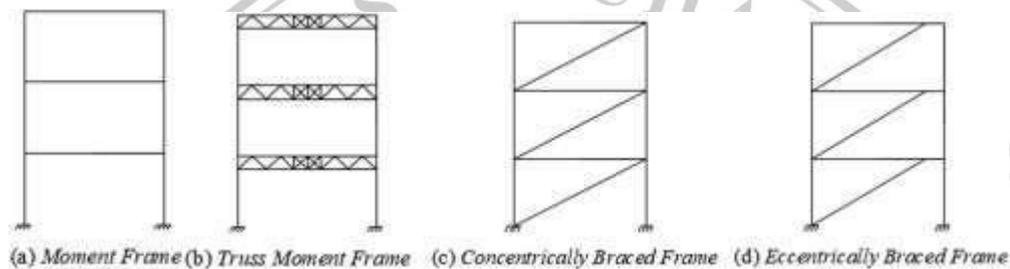
bangunan yang dominan beban gravitasi maupun beban rencana yang telah diketahui keberadaannya.

F). *Special Concentrically Braced Frame (SCBF)*

Rangka yang memakai SCBF (*Special Concentrically Braced Frame*) harus direncanakan secara khusus supaya *bracing* bisa bekerja ketika terjadi aksi tekuk tekan atau leleh tarik batang diagonal. Biasanya, sistem rangka ini digunakan di daerah yang memiliki potensi gempa besar.

G). *Eccentrically Braced Frame (EBF)*

Struktur rangka EBF (*Eccentrically Braced Frame*) direncanakan supaya bekerja secara inelastis dengan memanfaatkan leleh lentur dan leleh geser.



Gambar 2.3 Tipe Struktur Rangka Baja

Sumber : (Lesmana, 2021)

2.1.5 Paramater Gempa

A). Kategori Resiko Struktur Bangunan

Kategori resiko bangunan sangat dipengaruhi oleh manfaat maupun fungsi dari suatu bangunan. Pemilihan perencanaan ketahanan gempa untuk suatu struktur bangunan gedung dan non gedung disajikan pada tabel 3 dan 4 SNI 1726:2019. Sesudah diperoleh kategori resiko, selanjutnya akan ditentukan faktor keutamaan gempa berdasarkan tabel berikut :

Tabel 2. 2 Kategori Resiko Bangunan Gedung Dan Non gedung 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: <ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, 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,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik 	II
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan 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:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi <p>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.</p>	III

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> - 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, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan 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 <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV

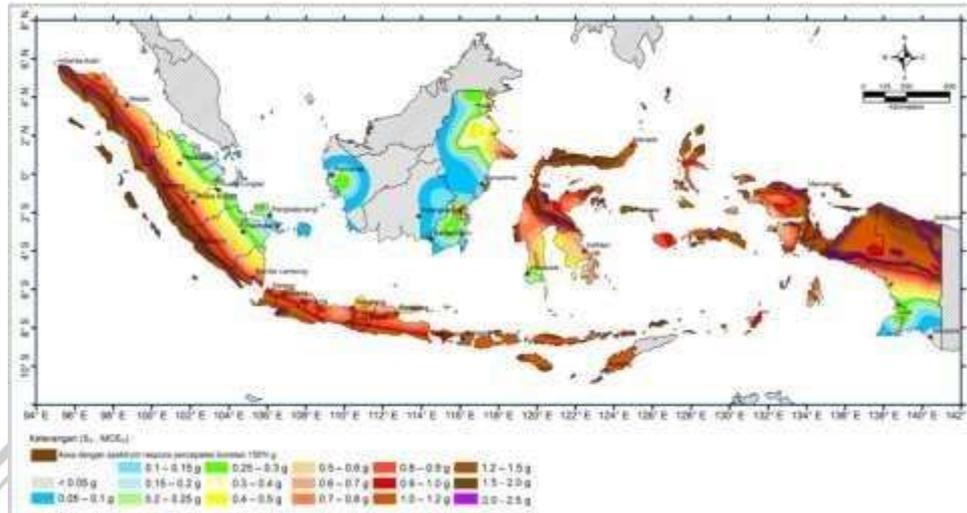
Tabel 2. 3 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, <i>I_e</i>
I atau II	1,00
III	1,25
IV	1,50

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2019a)

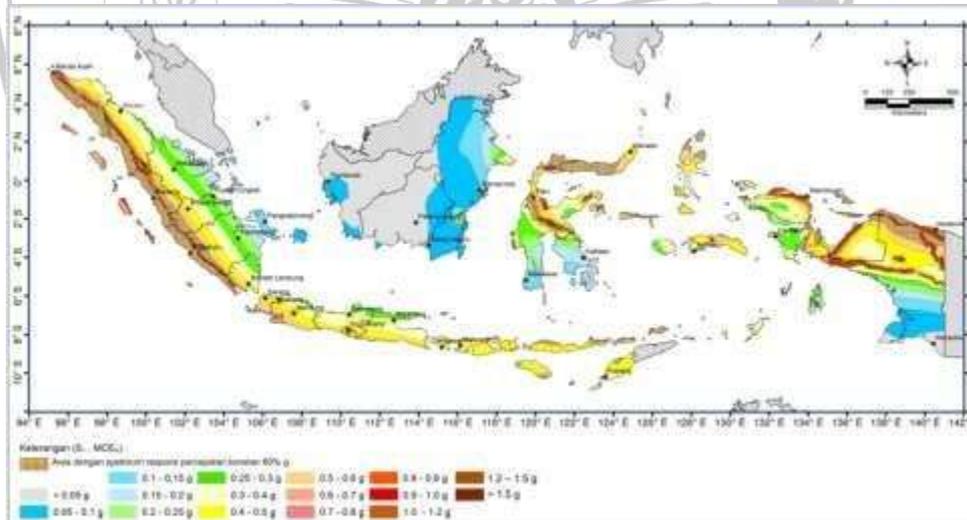
B). Parameter Spektrum Respons

Dalam menentukan parameter gempa daerah di Indonesia dapat dilihat pada peta gempa. Ada dua macam peta gempa yaitu peta untuk percepatan pada periode pendek (SS) dan periode 1 detik ($S1$). Berikut ini merupakan peta gempa berdasarkan pedoman SNI 1726:2019 Gambar 15 dan 16 :



Gambar 2. 4 Parameter Gerak Tanah S_s

Sumber : Desain Spektra Indonesia, RSA Ciptakarya



Gambar 2. 5 Parameter Gerak Tanah S_1

Sumber : Desain Spektra Indonesia, RSA Ciptakarya

C). Kelas Situs

Sifat-sifat tanah pada situs dijadikan dasar dalam penentuan kelas situs. Kelas situs meliputi SA (batuan keras), SB (batuan), SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak), SD (tanah sedang), SE (tanah lunak) atau SF (tanah khusus, yang

membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik). Dalam menentukan klasifikasi situs dapat dilihat pada SNI 1726:2019. Apabila sifat tanah pada suatu tempat tidak bisa teridentifikasi secara jelas, maka bisa memakai kelas situs SE.

Tabel 2. 4 Klasifikasi Situs

Kelas situs	Vs (m/detik)	N atau Nch	Su (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (Batuan)	750 - 1500	N/A	N/A
SC (Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 - 750	>50	>50
SD (tanah sedang)	175 - 350	15- 50	50 - 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 175	< 50
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs)	<p>Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3m tanah dengan karakteristik sebagai berikut:</p> <ul style="list-style-type: none"> Indeks plastisitas, $PI > 20$ Kadar air, $w \geq 40 \%$ Kuat geser niralisir $S_u < 25 \text{ kPa}$ <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 tesementasi lemah Lempung sangat organik dan atau gambut (ketebalan $H > 3\text{m}$) Lempung beplastisitas tinggi (ketebalan $H > 7.5 \text{ m}$ dengan indeks plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak setengah teguh dengan ketebalan $H > 35\text{m}$ dengan $S_u < 50 \text{ kPa}$ 		

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2019a)

D). Kategori Desain Gempa

Kategori desain seismik harus ditentukan ketika merencanakan struktur bangunan. Kegiatan tersebut dilakukan supaya bangunan lebih aman ketika terjadi gempa. Pedoman yang digunakan untuk menentukan kategori desain seismik yaitu SNI 1726:2019 tabel di bawah .

Tabel 2. 5 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek (SDS)

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 Standardisasi Nasional, 2019a)

Tabel 2. 6 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Dan Periode 1 Detik (SD1)

Nilai S_{D1}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2019a)

Tabel 2. 7 Koefisien Situs F_a

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa MCERTerpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, S_s				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF			SS^b		

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2019a)

Tabel 2. 8 Koefisien Situs F_v

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa MCERterpetakan pada periode 1 detik, S_s				
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \leq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF			SS^b		

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2019a)

Parameter percepatan spektral rencana untuk periode pendek (S_{Ds}) dan periode 1 detik (S_{D1}) dapat diperoleh dengan persamaan :

$$S_{Ds} = \frac{4}{3} S_{MS} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$S_{D1} = \frac{3}{3} S_{M1} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$S_{MS} = f_a \cdot S_s \dots \dots \dots (2.5)$$

$$S_{M1} = f_v \cdot S_l \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan :

S_s dan S_l = didapatkan dari peta gempa

F_a dan F_v = didapatkan dari koefisien situs

E). Gaya Geser Dasar Gempa

Besarnya gaya geser dasar gempa (V) diperoleh menggunakan persamaan :

$$V = C_s \times W \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan :

C_s = Koefisien respon seismik

W = Berat seismik efektif

F). Koefisien Respon Gempa

Koefisien respon gempa (C_s) bisa diperoleh menggunakan persamaan :

$$C_s = \frac{SDS}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan :

SDS = Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek

R = Faktor modifikasi respon

I_e = Faktor keutamaan gempa

G). Distribusi Vertikal Gaya Gempa

Gaya lateral gempa (F_x) bisa diperoleh menggunakan persamaan :

$$F_x = C_{VX} \times V \dots (2.7)$$

$$C_{VX} = \frac{W \times h^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan :

C_{VX} = Faktor distribusi vertikal

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

w_i dan w_x = Berat efektif total struktur pada tingkat yang ditinjau

h_i dan h_x = Tinggi dasar struktur sampai tingkat yang ditinjau

k = Eksponen yang terkait periode struktur

- jika $T \leq 0,5$ detik, maka $k = 1$
- jika $T \geq 2,5$ detik, maka $k = 2$
- jika T antara $0,5 - 2,5$ detik, dilakukan interpolasi linier

2.1.6 Perencanaan Stabilitas Struktur

Ketika merencanakan stabilitas struktur perlu menggabungkan analisa dalam menentukan kuat perlu penampang dan desain. Hal ini supaya struktur mempunyai kekuatan yang cukup untuk menahan beban. Untuk menganalisa stabilitas struktur bisa dilakukan 3 cara yaitu metode desain analisis langsung, metode panjang efektif, dan metode analisis orde pertama.

Kecacatan atau kurang sempurnanya elemen struktur seperti ketidaklurusan batang akibat proses fabrikasi atau saat pelaksanaan di lapangan akan menghasilkan efek ketidakseimbangan (*destabilizing*). Adanya cacat bawaan yang mengakibatkan efek *destabilizing* dalam *Direct Analysis Method* (DAM) dapat diselesaikan dengan dua cara, yaitu cara pemodelan langsung cacat pada geometri model yang dianalisis atau memberikan beban notional (beban lateral ekuivalen). Efek ketidaksempurnaan awal pada stabilitas struktur diperhitungkan melalui pemberian beban notional. Distribusi beban disalurkan sebagai beban lateral pada semua tingkat, sebagai tambahan dari beban lateral yang ada dan ditambahkan pada semua kombinasi pembebanan. Beban notional harus digunakan pada arah yang memberi efek *destabilizing* terbesar. Besarnya beban notional bisa ditentukan dengan berpedoman pada SNI 1729:2020 pasal C2.2 berikut :

$$N_i = 0,002 \alpha Y_i \dots\dots\dots (2.10)$$

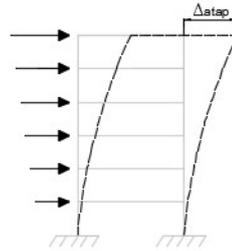
Keterangan :

N_i = beban *notional* di level i (N)

α = 1,0

Y_i = beban gravitasi di level i dari hasil beban kombinasi (N)

A). Drift Ratio



Gambar 2. 6 Drift Rasio

Drift ratio adalah rasio dari defleksi maksimum pada bagian ujung atas bangunan dengan total tinggi bangunan. Sebelum memperoleh *drift ratio* harus dilakukan kontrol terhadap nilai *story drift* sesuai SNI 1726:2019. Untuk batas *drift ratio* sebesar 0,0025, persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\delta_x = \frac{C_d \times \delta_{xe}}{L_e} \leq \Delta_a \dots \dots \dots (2.11)$$

$$\text{Drift ratio} = \frac{\Delta_{TOP}}{H} \leq 0,0025 \dots \dots \dots (2.12)$$

B). Simpangan Antar Tingkat

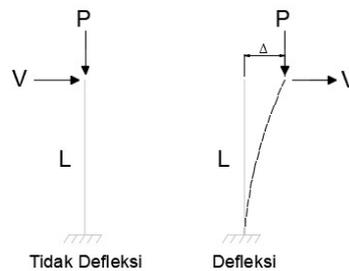
Penentuan simpangan antar tingkat desain harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada tingkat teratas dan tingkat dibawahnya. Sesuai SNI 1726:2019 pasal 7.12, batasan simpangan antar tingkat tidak boleh lebih dari simpangan *drift* antar tingkat ijin (Δ_a) dengan ketentuan sebagai berikut :

Tabel 2. 9 Simpangan Antar Tingkat Izin, Δ_a

Struktur	Kategori Resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain mengakomodasi simpangan antar tingkat untuk. Struktur dinding geser kantilever batu bata	0,025 h_{sx}	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}
Semua struktur lainnya	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}	0,010 h_{sx}

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2019a)

C). Efek P-Delta



Gambar 2. 7 Efek P-Delta

Efek P-delta ($P-\Delta$) adalah analisa orde kedua saat kolom yang menerima gaya aksial maupun gaya lateral akan terjadi defleksi pada ujung-ujung kolomnya. Defleksi ujung kolom dapat mengakibatkan berubahnya titik awal sehingga akan ada tambahan momen lentur.

Pengaruh P-Delta telah diatur dalam SNI 1726-2019 pasal 7.8.7. Tinjauan tersebut diperlukan saat bangunan mempunyai simpangan lateral yang cukup besar atau pada bangunan yang memiliki ketinggian lebih dari 10 lantai atau 40 meter.

Pengaruh P-Delta terhadap geser dan momen tingkat, gaya dan momen elemen struktur yang dihasilkan, serta simpangan antar lantai tingkat yang timbul karena pengaruh tersebut tidak diwajibkan untuk dihitung jika koefisien stabilitas ($\theta \leq 0,10$). Berikut ini koefisien stabilitas ditinjau berdasarkan batasan maksimal koefisien stabilitas (θ_{max}) :

$$\theta = \frac{Px \Delta le}{Vx hs Cd} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$\theta_{max} = \frac{0,5}{Q x Cd} \dots \dots \dots (2.14)$$

Keterangan :

Px = Beban desain vertikal total pada tingkat di atas (kN)

Δ = Simpangan antar lantai (mm)

Vx = Gaya geser seismik total tingkat yang ditinjau (kN)

Hsx = Tinggi antar tingkat yang ditinjau (mm)

Cd = Faktor pembesaran defleksi

B = Rasio kebutuhan geser terhadap kapasitas geser yang ditinjau = 1,0

2.2 Perencanaan Komposit Pada Elemen Pelat

2.2.1 Konsep Pembebanan

Ketika mendesain pelat harus memperhitungkan beban-beban yang bekerja pada struktur. Beban-beban ini mencakup beban yang bersumber dari dalam gedung maupun luar gedung. Beban-beban tersebut berupa beban mati, beban hidup, dan beban hujan. Berikut penjelasan mengenai beban-beban yang bekerja pada suatu bangunan :

A). Beban Mati

Beban mati merupakan berat pada bagian gedung yang bersifat tetap dan tidak dapat dipindahkan. Beban mati berupa berat peralatan yang tidak dapat dipisahkan dari suatu gedung dan material – material dari gedung sendiri. Berat satuan dari sejumlah material konstruksi dan komponen bangunan bisa ditentukan berdasarkan peraturan yang berlaku di Indonesia yakni Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983 pada tabel 2.1. Berikut pemaparan mengenai ringkasan berat satuan material yang digunakan dalam perencanaan struktur untuk perhitungan beban mati :

- Beton bertulang sebesar 2400 kg/m³
- *Floor deck* sebesar 6,52 kg/m²
- Plafond + penggantung sebesar 18 kg/m²
- Lantai keramik sebesar 24 kg/m²
- Spesi sebesar 21 kg/m²

B). Beban Hidup

Beban hidup merupakan suatu beban yang bisa ada maupun tidak ada pada kurun waktu tertentu. Artinya beban yang berada di bangunan yang bisa dipindahkan. Beban hidup bisa berupa berat orang atau penghuni bangunan, peralatan maupun perabotan yang bisa dipindahkan. Meski bisa dipindahkan, beban hidup tetap bekerja pada sebuah struktur bangunan. Konsep perencanaan pembebanan beban hidup berdasarkan pada SNI 1727:2020 tabel 4.3-1. Beban hidup yang direncanakan bekerja pada struktur dijabarkan sebagai berikut :

- Beban hidup atap datar dan berbubung sebesar 0,96 kN/m²
- Beban hidup lantai gedung untuk ruang pertemuan dengan kursi dapat dipindahkan sebesar 4,79 kN/m²

- Beban hidup lantai gedung untuk ruang pertemuan dengan panggung pertemuan sebesar 4,79 kN/m²

C). Beban Hujan

Dalam merencanakan suatu struktur bangunan, perlu dilakukan perencanaan atap supaya mampu menahan beban air hujan. Air hujan yang tertampung pada sistem drainase primer untuk bagian tertutup ditambah beban seragam yang diakibatkan oleh naiknya air di atas saluran masuk sistem drainase sekunder pada aliran yang direncanakan. Berdasarkan SNI 1727:2020 (8.3-1si), beban air hujan pada atap bangunan dapat dihitung sebagai berikut:

$$R = 0,0098 (ds + dh) \dots \dots \dots (2.15)$$

Keterangannya :

R = beban air hujan pada atap yang tidak melendut (kN/m²)

ds = kedalaman air pada atap yang tidak melendut meningkat ke lubang masuk sistem drainase sekunder apabila sistem drainase primer tertutup (mm)

dh = tambahan kedalaman air pada atap yang tidak melendut diatas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran air rencana (mm)

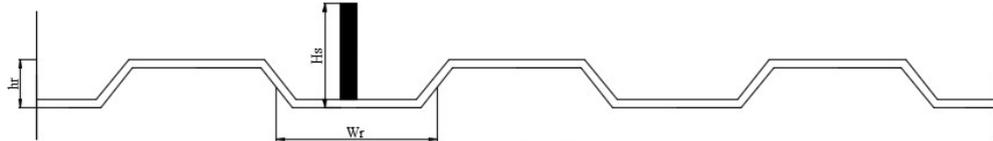
2.2.2 Deck Baja Gelombang

Deck (dek) baja gelombang bisa digunakan sebagai bekisting pelat beton dan tulangan pelat beton. Penggunaan dek baja juga bisa dipertimbangkan sebagai dukungan dalam arah lateral dari balok sebelum beton mulai mengeras. Arah dari gelombang dek baja umumnya diletakkan tegak lurus (*vertical*) dengan balok penopangnya. Ketika pemasangan dek baja di lapangan yakni dek baja dipasang pada arah bentang pendek balok. Secara umum untuk struktur komposit digunakan pelat satu arah.

Persyaratan dek baja gelombang dan penghubung gesernya supaya bisa digunakan pada komponen struktur komposit didasarkan pada SNI 1729:2020 pasal I3.2c yakni :

- Tinggi maksimum dek baja (*hr*) kurang dari 75 mm. Lebar rata-rata minimum dari dek gelombang (*wr*) harus lebih besar dari 50 mm, tetapi tidak boleh diambil dalam perhitungan sebagai lebih dari lebar bersih minimum di dekat bagian paling atas dari dek baja.

- Pelat beton disambungkan dengan balok baja menggunakan angkur steel headed stud, kemudian di las pada dek atau penampang melintang baja.
- Tebal pelat di atas dek baja tidak boleh kurang dari 50 mm.
- Dek baja harus diangkurkan ke semua komponen struktur pendukung pada spasi tidak lebih dari 460 mm.



Gambar 2. 8 Penampang Melintang Dek Baja Gelombang

Saat merencanakan pelat atap, *floor deck* akan menggantikan peranan dari tulang positif. Besarnya nilai momen kapasitas *floor deck* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Mn = As \cdot fy \cdot (d_{eff} - \frac{a}{2}) \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\alpha = \frac{As \cdot fy}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \dots\dots\dots (2.17)$$

Pada mulanya, rasio tulangan minimum harus ditentukan terlebih dahulu saat perencanaan tulang lapis atas. Berdasarkan SNI 2487:2019 pasal 9.6.1.2 yang selanjutnya nilai rasio tulangan minimum diambil yang terbesar antara dua persamaan berikut ini :

$$\rho_{min1} = \frac{0,25 \sqrt{f_c'} \cdot f_c'}{fy} \dots\dots\dots (2.18)$$

Atau

$$\rho_{min2} = \frac{1,4}{fy} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$R_n = \frac{Mu}{\phi \cdot b \cdot d^2} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$m = \frac{fy}{0,85 f_c'} \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \cdot R_n}{fy}} \right) \dots\dots\dots (2.22)$$

$$As = \rho \cdot b \cdot d \dots\dots\dots (2.23)$$

Setelah didapatkannya rasio tulangan, maka dihitung luas tulangan yang dibutuhkan (*As* teoritis). Kemudian akan didapatkan tulangan aktualnya sesuai pada Tabel 2.10.

Tabel 2. 10 Tabel Tulangan Penampang

Diameter batang (mm)	Luas Penampang (mm ²)					
	Jarak Spasi p.k.p (mm)					
	50	100	150	200	250	300
6	565.5	282.7	188.5	141.4	113.1	94.2
8	1005.3	502.7	335.1	251.3	201.1	167.6
9	1272.3	636.2	424.1	318.1	254.5	212.1
10	1570.8	785.4	523.6	392.7	314.2	261.8
12	2261.9	1131.0	754.0	565.5	452.4	377.0
13	2654.6	1327.3	884.9	663.7	530.9	442.4

Sumber : Struktur beton bertulang Istimawan Dipohusodo

Kontrol lendutan diambil berdasarkan pelat yang mempunyai bentang dan momen paling besar. Namun sebelumnya, dilakukan pemeriksaan terhadap tinggi minimum balok supaya mengetahui batas lendutan yang diizinkan. Dengan berpedoman pada SNI 2847:2019 pasal 9.3.1, tinggi minimum balok harus dikalikan dengan nilai sesuai tabel 2.8. Persamaan untuk mencari nilai H_{min} dijabarkan sebagai berikut :

$$H_{min} = (0,4 + \frac{f_y}{700}) \times h \dots\dots\dots (2.24)$$

Tabel 2. 11 Tinggi Minimum Balok Non-Prategang

Kondisi Perlekatan	Tinggi Minimum (h)
Perlekatan sederhana	$\ell / 16$
Menerus satu sisi	$\ell / 18,5$
Menerus dua sisi	$\ell / 21$
Kantilever	$\ell / 8$

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2019b)

Kontrol lendutan yang diperhitungkan berdasarkan pada tabel di atas tidak boleh melebihi batasan sesuai penjabaran berikut ini :

Tabel 2. 12 Perhitungan Lendutan Izin Maksimum

Jenis komponen struktur	Kondisi	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap datar	Tidak menumpu atau tidak dijadikan satu dengan komponen nonstruktural yang memiliki	Lendutan seketika karena L_r dan R maksimum	$l / 180$
Lantai	kemungkinan akan rusak jika terjadi lendutan yang besar	Lendutan seketika karena L (beban hidup)	$l / 360$

		Memiliki	Bagian dari lendutan total	
		kemungkinan akan	yang terjadi setelah	
	Menumpu	rusak jika terjadi	pasangan komponen	<i>1 / 480</i>
Atap atau	atau dijadikan	lendutan yang	nonstruktural yaitu jumlah	
lantai	satu dengan	besar	dari lendutan jangka	
	komponen	Tidak akan rusak	panjang akibat semua beban	
	nonstruktural	jika terjadi	tetap dan lendutan seketika	<i>1 / 240</i>
		lendutan yang	akibat penambahan beban	
		besar	hidup	

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional, 2019b)

Jika dek baja dipasangkan secara *vertical* (tegak lurus) terhadap balok penopangnya, maka kuat nominal penghubung geser jenis paku direduksi dengan suatu faktor. Faktor reduksi tersebut dapat diperhitungkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$r_s = \frac{0,85}{\sqrt{Nr}} \left(\frac{wr}{hr} \right) \left(\left(\frac{Hs}{hr} - 1,0 \right) \right) \leq 1,0 \dots\dots\dots (2.25)$$

Keterangan :

r_s = Faktor reduksi

Nr = Jumlah penghubung geser jenis paku pada setiap gelombang

Hs = Tinggi penghubung geser jenis paku ≤ (*hr* + 75 mm)

hr = Tinggi nominal gelombang dek baja

wr = Lebar efektif gelombang dek baja

2.3 Perencanaan Komposit Pada Elemen Balok

Struktur lentur atau struktur balok merupakan bagian struktur yang menahan beban secara tegak lurus (*vertical*) terhadap sumbu memanjangnya. Ketika balok memikul momen lentur yang besar, maka balok akan mengalami tekuk pada arah lateral. Oleh karena itu, diperlukan pengaku pada balok untuk mengantisipasi terjadinya tekuk lateral.

Pada pelaksanaan pembangunan struktur komposit (terutama komponen struktur lentur) biasanya dibedakan pada ada atau tidaknya perancah atau tumpuan sementara. Apabila perancah tidak digunakan (*unshored*) maka profil baja berfungsi sebagai penumpu bekisting dari pelat beton selama belum mengeras. Dengan begitu, pada tahap ini balok baja harus mampu menopang berat sendiri, berat

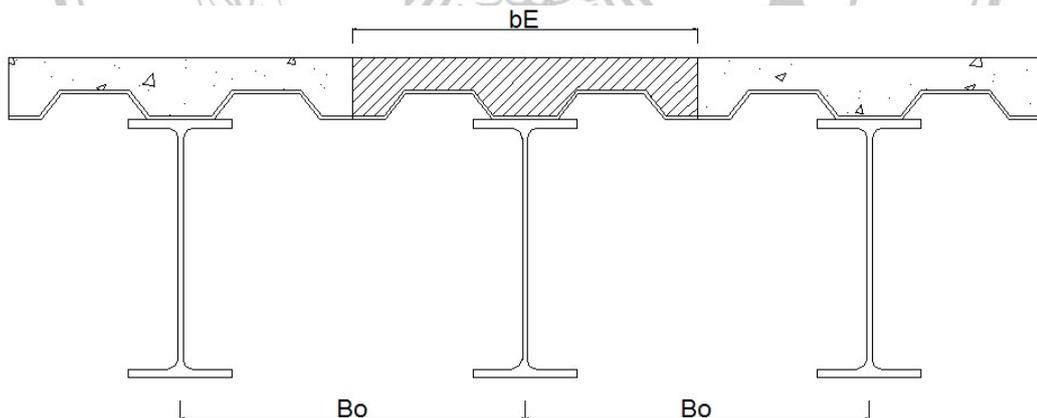
bekisting pelat, dan berat beton yang belum mengeras. Sesudah pelat beton mengeras maka komponen struktur komposit akan menopang seluruh beban layan. Beban layan mencakup beban mati maupun beban hidup.

Sementara itu, apabila dalam pelaksanaan menggunakan perancah (*shored*) selama pelat belum mengeras, maka perancah yang akan menopang berat profil baja, bekisting pelat, dan pelat beton yang belum mengeras. Melalui penggunaan perancah tersebut dapat mengurangi tegangan yang dihasilkan oleh profil baja dalam konstruksi. Selanjutnya, jika pelat beton sudah mengeras dan perancah dapat dilepas, maka komponen struktur komposit akan menopang seluruh beban layan.

2.3.1 Lebar Efektif Balok

Pada perencanaan suatu struktur bangunan perlu memperhitungkan lebar efektif. Khususnya, pada sebuah desain yang mempunyai distribusi tegangan yang tidak seragam. Berdasarkan pada SNI 1729:2020 pasal I3.1 yang menyatakan bahwa lebar efektif pelat beton bisa diambil dari jumlah lebar efektif untuk masing-masing sisi sumbu balok. Dengan demikian, lebar efektif balok bisa menggunakan pernyataan sesuai dibawah ini :

- $b_E \leq \frac{1}{8}$ bentang balok, jarak as ke as tumpuan
- $b_E \leq \frac{1}{2}$ jarak antar sumbu yang berdekatan
- $b_E \leq$ jarak ke tepi slab



Gambar 2. 9 Lebar Efektif Balok

2.3.2 Kekuatan Lentur Nominal

A. Kuat Lentur Positif

Kuat lentur positif rencana ($\phi b Mn$) maupun kuat lentur positif yang diizinkan ($Mn / \Omega b$) harus diperhitungkan untuk keadaan batas leleh berdasarkan pada SNI 1729:2020 pasal I3.2a berikut ini :

- Untuk $\frac{h}{tw} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{fy}}$

Mn harus ditentukan dari distribusi tegangan plastis pada penampang komposit untuk keadaan batas leleh (momen plastis)

- Untuk $\frac{h}{tw} > 3,76 \sqrt{\frac{E}{fy}}$

Mn harus ditentukan dari superposisi tegangan elastis, dengan memperhitungkan efek penopangan, untuk keadaan batas leleh (momen leleh).

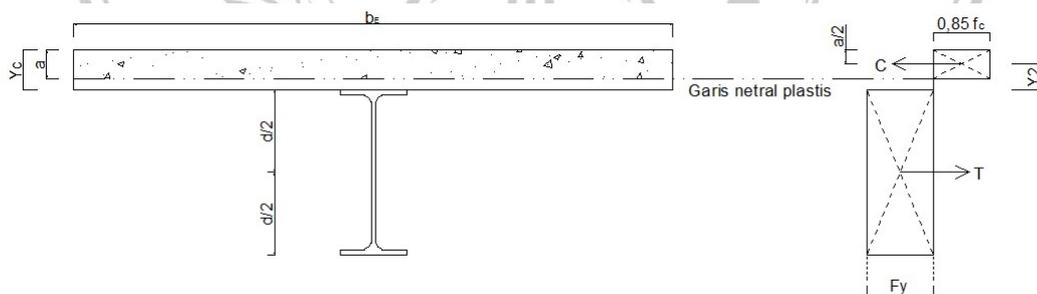
Pada saat menghitung momen plastis suatu balok komposit harus dicari posisi sumbu netral plastis, dimana posisinya tergantung pada proporsi C dan T dengan nilai resultan gaya tekan dan tarik sebagai berikut:

$$C = 0,85 f'c \times Ac \dots\dots\dots (2.26)$$

$$T = Fy \times As \dots\dots\dots (2.27)$$

Terdapat 3 kondisi distribusi tegangan plastis yang kemungkinan terjadi yaitu:

1). Jika $T \leq C$ sumbu netral plastis didalam pelat beton



Gambar 2. 10 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi a

Volume pelat betonnya relatif besar, sehingga ketika terjadi momen lentur positif profil baja mengalami leleh terlebih dahulu. Tinggi blok tegangan tekan pada pelat beton (a) dapat dihitung sebagai berikut:

$$a = \frac{As.Fy}{0,85 fc'.bg} \dots\dots\dots (2.28)$$

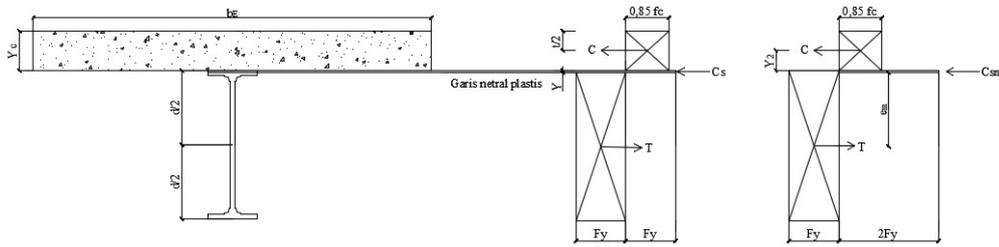
Asumsi benar jika $a < tc$ jika pakai dek baja, atau $a < t$ pelat beton solid.

$$Y_c = h_r + t_c \dots\dots\dots (2.30)$$

$$Y_2 = Y_c - 1/2 a \dots\dots\dots (2.31)$$

$$M_n = M_p = F_y \times A_s \times (Y_2 + 1/2 d) \dots\dots\dots (2.32)$$

2). Jika $T \leq C$ sumbu netral plastis Dibaja (Pelat Sayap)



Gambar 2. 11 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi b

Kondisi ini terjadi apabila luasan pelat beton relatif lebih kecil dibanding kopel tarik profil baja. Oleh karena itu, ketika terjadi momen positif maka profil baja juga masih mengalami desak. Hal itu terjadi apabila $t_f > y > 0$ yang dihitung dengan rumusan berikut :

$$T = F_y \times A_s \dots\dots\dots (2.33)$$

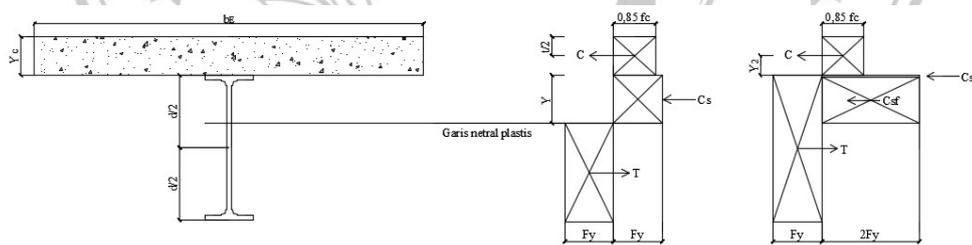
$$C = 0,85 f_c' \times b_g \times t_c \dots\dots\dots (2.34)$$

$$V = \frac{T-C}{b_f \times F_y} \leq t_f \dots\dots\dots (2.35)$$

$$C_{sm} = 2F_y \times y \dots\dots\dots (2.36)$$

$$M_n = M_p = C (Y_2 + 1/2 d) + C_{sm} (d - y) 1/2 \dots\dots\dots (2.37)$$

3). Jik a $T \leq C$ sumbu netral plastis Dibaja (Pelat Badan)



Gambar 2. 12 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi c

Apabila $y > t_f$ artinya kondisi ini yang mungkin terjadi. Luas pelat beton relatif lebih kecil dibanding luas profil baja. Untuk keseimbangan gaya, akibatnya bagian pelat badan dari profil baja juga masih mengalami tekan. Kondisi ini dapat terjadi jika $T - C - C_{sf} > 0$. Adapun nilai-nilainya dihitung sebagai berikut :

$$T = F_y \times A_s \dots\dots\dots (2.38)$$

$$C = 0,85 f_c' x b_E x t_c \dots\dots\dots (2.39)$$

$$C_{sf} = b_f x t_f 2F_y \dots\dots\dots (2.40)$$

$$V = \frac{T-C-C_{sf}}{t_f x F_y} \leq t_f \dots\dots\dots (2.41)$$

$$C_{sm} = 2F_y x y x t_w \dots\dots\dots (2.42)$$

$$y_f = \frac{1}{2} (d - t_f) \dots\dots\dots (2.43)$$

$$y_w = \frac{1}{2} (d + y) - t_f \dots\dots\dots (2.44)$$

$$M_n = M_p = C (Y_2 + \frac{1}{2} d) + (C_{sf} x y) + (C_{sw} x y_w) \dots\dots\dots (2.45)$$

B. Kuat Lentur Negatif

Secara umum, suatu komponen struktur komposit yang bisa didesain terdapat pada daerah momen positif. Kemudian, untuk daerah momen negatif menggunakan komponen struktur non komposit. Namun pada peraturan SNI 1729:2020 pasal I3.2b sudah diizinkan menggunakan struktur komposit pada daerah momen negatif. Dengan syarat sebuah struktur harus memenuhi kriteria berikut ini :

- Balok baja termasuk penampang kompak yang memiliki pengaku.
- Pelat dengan balok baja disambung menggunakan angkur kanal baja pada daerah momen negatifnya.
- Tulangan pelat yang sejajar dengan balok baja disalurkan pada lebarefektif pelat.

Tulangan yang ditempatkan sejajar dengan sumbu longitudinal balok baja dan terletak pada pelat beton yang mempunyai lebar efektif (b_E) dapat digunakan sebagai bagian dari penampang komposit efektif. Hal tersebut dapat digunakan pada daerah momen positif dan daerah momen negatif. Akan tetapi, pada daerah momen positif tulangan hanya memberikan sedikit kontribusi. Hal itu berbanding terbalik pada pelat beton, pada daerah momen negatifnya berada dalam keadaan tarik. Pada nyatanya beton tidak mempunyai kemampuan yang cukup untuk menahan gaya tarik. Maka sebab itu, pada daerah momen negatif pelat beton dapat diabaikan.

Apabila tulangan yang dipasang pada pelat beton akan diperhitungkan kontribusinya pada penampang komposit, maka gaya yang timbul pada tulangan harus ditransfer oleh penghubung geser. Kuat nominal yang timbul pada tulangan dapat dihitung sebesar :

$$T_{sr} = A_{sr} \times F_{ysr} \dots\dots\dots (2.46)$$

Gaya tekan maksimum dari profil baja adalah :

$$C_{maks} = A_s \times F_y \dots\dots\dots (2.47)$$

Karena $C_{maks} > T_{sr}$, maka sumbu netral plastis akan jatuh pada profil baja dan kesetimbangan gaya dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$T_{sr} + T_s = C_{maks} - T_s \dots\dots\dots (2.48)$$

$$2T_s = C_{maks} - T_{sr} \dots\dots\dots (2.49)$$

$$T_s = \frac{C_{maks} - T_{sr}}{2} \dots\dots\dots (2.50)$$

$$\text{Gaya pada sayap, } T_f = b_f \cdot t_f \cdot F_y \dots\dots\dots (2.51)$$

$$\text{Gaya pada badan, } T_w = T_s - T_f \text{ (2.50)} \dots\dots\dots (2.52)$$

Jarak sumbu netral dari tepi bawah flens adalah :

$$a_w = \frac{T_w}{F_y T_w} \dots\dots\dots (2.53)$$

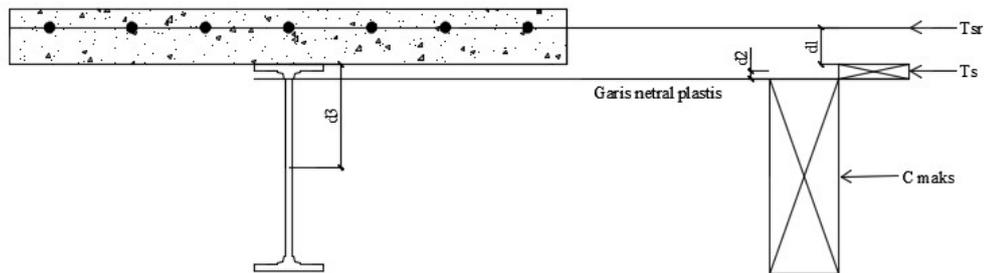
Menentukan jarak gaya yang bekerja dari centroid :

$$d_1 = Y_c - \frac{T_c}{2} \dots\dots\dots (2.54)$$

$$d_2 = \frac{a_w}{2} \dots\dots\dots (2.55)$$

$$d_3 = \frac{1}{2} d \dots\dots\dots (2.56)$$

$$M_n = T_{sr} (d_1 + d_2) + C_{maks} (d_3 - d_2) \dots\dots\dots (2.57)$$



Gambar 2. 13 Distribusi Tegangan Akibat Momen Negatif

C. Kuat Geser Nominasi

Berdasarkan pada SNI 1729:2020 pasal G2, untuk memperhitungkan kuat geser nominal dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\frac{h}{tw} \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots(2.58)$$

$$V_n = 0,6 F_y \times A_w \times C_{v1} \dots\dots\dots(2.59)$$

Keterangan :

V_n = Kuat geser nominal (N)

ϕ_v = Faktor tahanan untuk geser (0,90)

A_w = Luas badan (mm²)

C_{v1} = 1,0

D. Angkur Baja Stand Berkepala

Dengan berpedoman pada SNI 1729:2020 pasal I8, diameter angkur baja stad berkepala (*steel headed stud*) harus kurang dari 19 mm dan juga tidak boleh lebih besar dari 2,5 kali ketebalan logam dasar. Selain itu, panjang dari angkur *steel headed stud* harus lebih besar empat kali dari diameter batang dihitung dari dasar angkur *steel headed stud* pada bagian atas kepala batang setelah pemasangan.

Kuat geser nominal satu angkur yang ditanamkan pada pelat beton dan pelat komposit dengan dek baja dapat menggunakan persamaan berikut ini :

$$Q_n = A_{sa} \sqrt{F_c \times E_c} \leq R_g \times R_p \times A_{sa} \times F_u \dots\dots\dots(2.60)$$

Keterangan :

A_{sa} = Luas penampang dari angkur baja (mm²)

E_c = Modulus elastisitas beton (Mpa)

F_u = Kuat tarik minimum (MPa)

Tabel 2. 13 Nilai R_g dan R_p

Kondisi	R_g	R_p
Dek diorientasikan sejajar dengan profil baja		
$\frac{W_r}{h_r} \geq 1,5$	1,00	0,75
$\frac{W_r}{h_r} < 1,5$	0,85	0,75
Dek diorientasikan tegak lurus dengan profil baja		
Jumlah angkur <i>steel headed stud</i> yang mempunyai rusuk dek sama		
1	1,00	0,60
2	0,85	0,60
3 atau lebih	0,70	0,60

Keterangan :

W_r = Tinggi rusuk nominal (mm)

h_r = Lebar rata-rata rusuk (mm)

Sumber :SNI 1729:2020

Kekuatan geser nominal satu angkur kanal canai panas yang ditanamkan pada pelat beton dapat menggunakan persamaan berikut ini :

$$Q_n = 0,3 (t_w + 0,5 t_w) x l_a x \sqrt{f^1} x E_c \dots \dots \dots (2.61)$$

Keterangan :

l_a = Panjang angkur (mm)

t_f = Ketebalan dari sayap angkur (mm)

t_w = Ketebalan dari badan angkur (mm)

Melalui pengelasan kanal ke sayap balok supaya dapat meningkatkan kekuatan dari angkur kanal dengan tetap memperhitungkan juga eksentrisitas pada konektor. Jumlah angkur baja yang diperlukan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$V' = F_y \times A_s \dots \dots \dots (2.62)$$

$$N = \frac{V'}{Q_n} \dots \dots \dots (2.63)$$

Keterangan :

N = Jumlah angkur yang dibutuhkan

V' = Gaya geser horizontal

Q_n = Kuat geser nominal satu buah angkur konektor (N)

2.4 Perencanaan Kolom

Bagian struktur yang menahan beban aksial tekan dan lentur secara bersamaan disebut dengan struktur kolom. Kemampuan struktur kolom mampu memikul momen, misalnya balok maupun memikul aksial tekan seperti elemen tekan sehingga kolom disebut juga sebagai *beam-column* (Lesmana, 2021).

2.4.1 Panjang Efektif

Pada saat memperkirakan kekuatan kolom ada cara yang efektif yakni dengan memperhitungkan panjang efektif kolom. Panjang efektif ditentukan dengan mencari korelasi bentuk tekuk yang sesuai konsep Euler. Konsep Euler merupakan sebuah konsep dasar yang digunakan dalam merencanakan struktur tekan. Adapun persamaan beban tekuk kritis yang dirumuskan oleh Euler, dimana faktor panjang efektif diperhitungkan yaitu:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 x EI}{(KL)^2} \dots \dots \dots (2.64)$$

Keterangan :

- E = Modulus elastisitas (Mpa)
- I = Inersia penampang (mm⁴)
- K = Nilai kekakuan struktur batang tekan (kN/m)
- L = Panjang struktur tekan (m)

Panjang efektif (L_c) ialah nilai kekakuan suatu batang tekan dalam perencanaan struktur. Panjang efektif digunakan untuk menghitung kelangsingan sebuah struktur. Ketika merencanakan panjang efektif dapat diperoleh berdasarkan pedoman SNI 1729:2020 pasal E2 yaitu :

$$L_c = K \times L \dots\dots\dots (2.65)$$

Keterangan :

- L_c = Panjang efektif batang tekan (mm)
- L = Panjang batang tekan (mm)
- K = Faktor panjang efektif (lihat Gambar 2.5)

Nilai kelangsingan efektif dibatasi tidak lebih dari 200. Hal tersebut berpedoman pada SNI 1729:2020 pasal E2. Berkaitan dengan persamaan dapat dilihat dan dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{lc}{r} \leq 200 \dots\dots\dots (2.66)$$

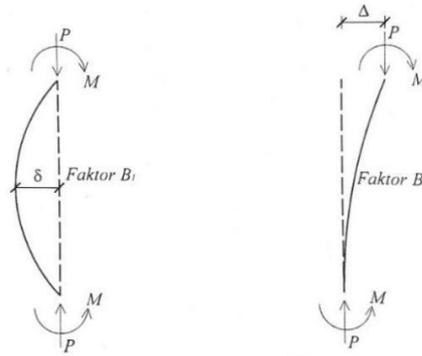
$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \dots\dots\dots (2.67)$$

Fenomena tekuk						
Nilai k (teoritis)	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Nilai k (ideal)	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Arti simbol	Perletakkan Rol Perletakkan Sendi Ujung bebas			Perletakkan Jepit Perletakkan Sendi		

Gambar 2. 14 Nilai K Untuk Batang Tekan

Sumber : (Lesmana, 2021)

Nilai panjang efektif tidak mudah untuk dievaluasi dilapangan. Oleh karena itu, dibutuhkan penyederhanaan dari sebuah struktur tekan dilapangan. Dalam hal ini, struktur tekan dibedakan menjadi 2 kategori yaitu :



(a) Kolom tidak bergoyang (b) Kolom bergoyang

Gambar 2. 15 Analisa Struktur Kolom

Sumber : (Lesmana, 2021)

A). Kolom Tak Bergoyang : $0,5 \leq K \leq 1,0$

Kolom tak bergoyang merupakan suatu kolom yang tidak mengalami translasi arah lateral pada daerah ujungnya (Lesmana, 2021). Kolom tak bergoyang mempunyai ujung yang tetap atau tidak ada perpindahan sebagaimana pada Gambar 2.14 a. Keadaan tersebut terjadi pada struktur kolom yang menerima beban gravitasi tanpa ada pengaruh beban lateral yang berupa gempa atau angin. Persamaan yang digunakan untuk kolom tidak bergoyang berdasarkan SNI 1729:2020 lampiran 8.2.1 yakni sebagai berikut :

$$M_r = B_1 \times M_{nt} \dots\dots\dots (2.68)$$

$$P_r = P_{nt} \dots\dots\dots (2.69)$$

Adapun parameter faktor pembesaran momen (B_1) yaitu :

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \alpha \frac{P_r}{P_{e1}}} \geq 1 \dots\dots\dots (2.70)$$

$$P_{e1} = \frac{\pi^2 EI}{(Lc1)^2} \dots\dots\dots (2.71)$$

Keterangan :

- M_r = Momen lentur perlu orde kedua (N-mm)
- M_{nt} = Momen perlu dari hasil analisa struktur elastis linear (N-mm)
- P_r = Gaya aksial perlu orde kedua (N)
- P_{nt} = Gaya aksial dari hasil analisa struktur elastis linear (N)
- C_m = Koefisien untuk kolom tak bergoyang

- Balok kolom yang tidak memikul beban transversal antara tumpuan dibidang lentur : $C_m = 0,6 - 0,4 \frac{M_1}{M_2} \dots\dots\dots (2.72)$

- Balok kolom yang memikul beban transversal antara tumpuan
dibidang lentur : $C_m = 1,0$

P_{el} = Kekuatan tekuk kritis (N)

L_{cl} = Panjang efektif dibidang lentur (mm) $\alpha = 1,0$

B). Kolom Bergoyang $1,0 \leq K \leq \infty$

Kolom bergoyang merupakan suatu kolom yang mengalami translasi arah lateral pada daerah ujungnya (Lesmana, 2021). Kolom bergoyang memiliki perpindahan pada ujungnya, seperti pada Gambar 2.12 b. Kondisi ini terjadi pada struktur kolom yang menerima beban gravitasi dan beban lateral (gempa atau angin). Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk kolom bergoyang berdasarkan SNI 1729:2020 lampiran 8.2 :

$$M_r = (B_1 \times M_{nt}) + (B_2 \times M_{lt}) \dots \dots \dots (2.73)$$

$$P_r = P_{nt} + (B_2 \times P_{lt}) \dots \dots \dots (2.74)$$

Adapun parameter faktor pembesaran momen (B_2) adalah :

$$B_1 = \frac{1}{1 - \alpha \frac{P_{story}}{P_{e story}}} \geq 1 \dots \dots \dots (2.75)$$

$$P_{e story} = R_M \frac{HL}{\Delta H} \dots \dots \dots (2.76)$$

$$R_M = 1 - 0,15 \frac{P_{mf}}{P_{e story}} \dots \dots \dots (2.77)$$

Keterangan :

P_{story} = Total beban vertikal dari semua kolom pada tingkat yang ditinjau (N)

$P_{e story}$ = Kekuatan tekuk kritis elastis pada tingkat yang ditinjau sesuai arah perpindahan (N)

R_M = Faktor yang memperhitungkan efek P- Δ

H = Gayar geser pada ujung kolom (N)

L = Tinggi tingkat (mm)

ΔH = Drift antar tingkat hasil analisa

P_{mf} = Total beban vertikal pada kolom yang ditinjau (N)

α = 1,0

2.4.2 Kuat Tekan Nominal Pada Elemen Kolom

Tekuk global merupakan suatu kondisi tekuk yang dipengaruhi oleh kelangsingan dan bentuk penampangnya. Umumnya tekuk global terjadi pada penampang yang tidak langsing. Dalam menetapkan kategori penampang langsing dan tidak langsing dilakukan evaluasi rasio lebar-tebal (b/t) penampang terhadap nilai batas rasio (λ_r) sesuai dengan SNI 1729:2020 tabel B4.1a. Jika nilai rasio lebar-tebal kurang dari nilai batas rasio maka dikategorikan penampang tidak langsing, dan jika sebaliknya maka dikatakan sebagai penampang langsing. Tekuk global dibagi menjadi 3 yaitu tekuk lentur, tekuk torsi, dan kombinasi tekuk torsi lentur. Ketiga tekuk ini akan dibahas sesuai pedoman SNI 1729:2020 pasal E3 dan E4.

A. Tekuk Lentur

Suatu fenomena tekuk global pada penampang tekan yang tidak tergolong langsung disebut dengan tekuk lentur (Lesmana, 2021). Tekuk lentur biasanya terjadi pada penampang tekan yang tidak langsing. Adapun untuk mencegah tekuk lentur yakni dengan mengetahui nilai kuat tekan nominal. Persamaan untuk mencari kuat tekan nominal sebagai berikut:

$$\phi_c P_n \geq P_u \dots \dots \dots (2.78)$$

$$P_n = F_{cr} \times A_g \dots \dots \dots (2.79)$$

Kemudian, persamaan untuk mencari nilai tegangan kritis dijelaskan sebagai berikut :

- Jika $\frac{L_c}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25$ maka nilai F_{cr} :

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y \dots \dots \dots (2.80)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} \dots \dots \dots (2.81)$$

- Jika $\frac{L_c}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25$ maka nilai F_{cr} :

$$F_{cr} = 0,877 F_y \dots \dots \dots (2.82)$$

Keterangan :

P_n = Kuat tekan nominal pada kondisi tekuk lentur (N)

F_{cr} = Tegangan kritis pada batang tekan kondisi tekuk lentur (Mpa)

- A_g = Luasan utuh penampang batang tekan (mm²)
 ϕ_c = Faktor reduksi kuat tekan (0,90)
 F_y = Tegangan leleh minimum (Mpa)
 F_e = Tegangan tekuk elastis (Mpa)

B. Tekuk Torsi dan tekuk Torsi Lentur

Tekuk torsi dan tekuk torsi lentur dikhususkan pada penampang tidak langsing yang mempunyai struktur simetris dan asimetris tunggal, struktur simetris ganda, serta struktur silang. Kemudian, juga pada siku tunggal dengan $b/t > 0,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$. Persamaan untuk mencari kuat tekan nominal dijabarkan berikut ini:

$$\phi_c P_n \geq P_u \quad (2.83)$$

$$P_n = F_{cr} \times A_g \dots \dots \dots (2.84)$$

Pada nilai tegangan kritis (F_{cr}) mengaplikasikan persamaan 2.25 dan 2.27 seperti diatas. Kemudian, untuk mencari nilai tegangan tekuk elastis torsi atau torsi lentur (F_e) menggunakan persamaan berikut:

- Pada struktur simetris tunggal yang mengalami torsi terhadap pusat geser

$$F_e = \left(\frac{\pi^2 E C_w}{L_{cz}^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{I_x + I_y} \dots \dots \dots (2.85)$$

- Pada struktur simetris tunggal yang mengalami torsi terhadap pusat geser yakni sumbu simetri

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H} \right) \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4e_y \cdot F_{ez} \cdot H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}} \right) \dots \dots \dots (2.86)$$

- Pada struktur asimetris yang mengalami torsi terhadap pusat geser

$$(F_e - F_{ex})(F_e - F_{ey})(F_e - f_{ez}) - F_e^2(F_e - F_{ey})\left(\frac{x_o}{r_o}\right)^2 = 0 \dots \dots \dots (2.87)$$

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{r_x}\right)^2} \dots \dots \dots (2.88)$$

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{r_y}\right)^2} \dots \dots \dots (2.89)$$

$$F_{ez} = \left(\frac{\pi^2 E C_w}{L_{cz}^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{A_g r_o^2} \dots \dots \dots (2.90)$$

2.4.3 Interaksi Lentur Dan Gaya Tekan (Balok-Kolom)

Perhitungan balok kolom (batang portal) harus digunakan dalam merencanakan suatu struktur yang elemen batangnya hendak menerima gabungan dari gaya aksial dan momen. Hakikatnya pada perencanaan batang portal dapat dilihat dari kuat tekan dan kuat lenturnya. Hasilnya, diketahui jika kuat tekan diakibatkan karena gaya aksial, sedangkan kuat lentur diakibatkan karena gaya lentur. Pada akhirnya, keduanya akan dihubungkan dengan persamaan interaksi antara kuat tekan dan kuat lentur. Merujuk pada SNI 1729:2020 pasal H1 yang menjabarkan mengenai interaksi lentur dan gaya tekan pada struktur simetris ganda dan komponen struktur simetris tunggal yang melentur terhadap sumbu geometris (x atau y) dibatasi oleh persamaan berikut:

$$\text{Jika } \frac{Pr}{Pc} \geq 0,2 \text{ maka : } \frac{Pr}{Pc} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1,0 \dots \dots \dots (2.91)$$

$$\text{Jika } \frac{Pr}{Pc} \geq 0,2 \text{ maka : } \frac{Pr}{Pc} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1,0 \dots \dots \dots (2.92)$$

Keterangan :

Pr = Kekuatan aksial perlu (N)

Pc = Kekuatan aksial desain (N)

Mr = Kekuatan lentur perlu (Nmm)

Mc = Kekuatan lentur desain (Nmm)

2.5 Perencanaan Sambungan

Penentuan jenis dan detail sambungan menjadi aspek fundamental dalam perencanaan konstruksi baja. Pada umumnya, sambungan mempunyai jumlah yang relatif banyak dan beragam. Sistem sambungan pada struktur baja mempunyai keunggulan apabila dibandingkan dengan struktur beton. Untuk struktur beton biasanya akan dilakukan pengecoran di lapangan. Sementara itu, pada struktur baja berupa elemen-elemen lepas sehingga ketika berada di lapangan harus dirakit dengan sambungan terlebih dahulu. Dengan demikian, suatu sambungan pada struktur baja yang dipilih berpengaruh terhadap biaya, kekuatan, cara maupun waktu pelaksanaan di lapangan.

Pada struktur baja, salah satu sambungannya yakni sambungan baut. Umumnya, masa kini sambungan baut telah banyak dipergunakan pada konstruksi bangunan. Akan tetapi, dalam penggunaan sambungan baut harus diperhatikan

kelebihan maupun kegagalan yang dimiliki oleh sambungan baut. Kelebihan yang dimiliki sambungan baut dijabarkan sebagai berikut :

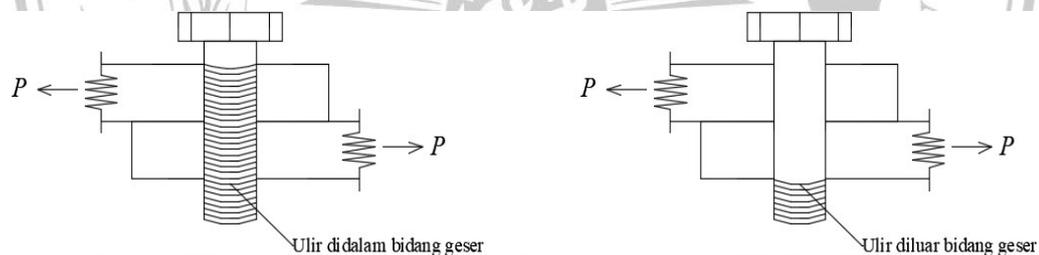
- Pemasangannya lebih mudah, cepat dan tidak diperlukan keahlian khusus untuk pemasangannya.
- Jika dibandingkan dengan sambungan las, untuk upah pekerja harganya lebih ekonomis.
- Harga peralatan untuk pemasangan sambungan baut relatif lebih murah (Lesmana, 2021).

Berdasarkan SNI 1729:2020 tabel J3.2, kuat nominal pengencang baut pada bagian ulir dijabarkan sebagai berikut :

Tabel 2. 14 Kuat Nominal Baut

Deskripsi Pengencang	Kekuatan Tarik Nominal, F_{nt} (Mpa)	Kekuatan Geser Nominal, F_{nv} (Mpa)
Baut A307	310	186
Baut A325 (ulir berada di bidang geser)	620	372
Baut A325 (ulir berada di luar dibidang geser)	620	469
Baut A490 (ulir berada di bidang geser)	780	469

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2020b)



Gambar 2. 16 Kondisi Bagian Ulir Baut Dalam Sambungan

Sumber : (Lesmana, 2021)

Saat menganalisis kekuatan baut perlu diperhatikan gaya-gaya yang bekerja pada sambungan. Adanya gaya-gaya yang diterima oleh baut akan berpengaruh terhadap tipe sebuah sambungan. Kekuatan baut dianalisa dengan berpedoman pada SNI 1729:2020 pasal J4.

2.5.1 Sambungan Baut Tipe Geser

Sambungan baut tipe geser harus menggunakan baut dengan kualitas tinggi. Hal ini dikarenakan akan berpengaruh pada kekuatan dan kekakuan sebuah sambungan. Dalam perencanaan sambungan yang menggunakan baut harus diperhitungkan gaya-gaya yang akan bekerja. Gaya-gaya tersebut nantinya akan

dipergunakan sebagai acuan dalam memperoleh banyaknya jumlah baut yang diperlukan supaya membuat sebuah struktur baja yang aman dan ekonomis.

A. Mekanisme Kritis Selip

Ketika sebuah elemen tidak terbebani maka baut tidak akan mengalami selip sehingga kritis selip yang sedang bekerja. Sebaliknya, ketika sebuah elemen dibebani baut maka baut akan mengalami selip, dimana tumpu yang sedang bekerja. Oleh karena itu, sambungan kritis selip (*critical slip*) direncanakan supaya mampu mencegah selip pada sambungan. Biasanya, sistem sambungan tersebut dipakai untuk mengatasi ketika terjadi beban dinamik atau beban bolak balik, contohnya pada jembatan maupun mesin industri. Apabila hal itu terjadi secara terus-menerus dalam jangka waktu yang lama, hasilnya struktur dapat berisiko tinggi mengalami kerusakan ataupun keruntuhan pada kondisi tegangan elastis. Berikut ini persamaan yang digunakan untuk keadaan batas slip sesuai SNI 1729:2020 pasal J4.8 :

$$R_n = \mu \times D_u \times h_f \times T_b \times n_s \dots \dots \dots (2.93)$$

Keterangan :

- μ = Koefisien selip rata-rata (0,30 untuk kelas A; 0,50 untuk kelas B)
- D_u = Rasio rata-rata pratarik baut (1,13)
- h_f = Faktor untuk pengisi
 - 1,00 untuk satu pengisi bagian-bagian yang disambung
 - 0,85 untuk lebih dari satu pengisi bagian-bagian yang disambung
- T_b = Gaya tarik minimum, lihat tabel 2.15 (kN)
- n_s = Jumlah selip yang diijinkan
- ϕ = 1,00 untuk lubang ukuran standar dan slot pendek yang tegak lurus terhadap arah beban; 0,85 untuk lubang ukuran berlebih dan slot pendek yang paralel terhadap arah beban; 0,70 untuk lubang slot panjang

Tabel 2. 15 Pratarik Baut Minimum (kN)

Ukuran baut, mm	Kelompok A (Baut A325)	Kelompok B (Baut A490)
M16	91	114
M20	142	179
M22	176	221
M24	205	257
M27	267	334

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2020b)

B. Mekanisme Tumpu

Kekuatan tumpu (*bearing strength*) terjadi ketika kritis selip mengalami kegagalan. Peristiwa ini ditandai dengan adanya selip. Kekuatan tumpu artinya ketika baut menumpu pada profil baja atau pelat sambungan, kemudian dibutuhkan analisa terhadap profil baja atau pelat sambungan yang menjadi tumpuan. Kekuatan tumpu dipengaruhi oleh posisi maupun jarak antar baut. Jumlah baut yang diperlukan biasanya relatif lebih sedikit apabila dibandingkan dengan menggunakan mekanisme kritis selip. Persamaan untuk memperoleh kuat tumpu baut berpedoman pada SNI 1729:2020 pasal J4.10 yang dijabarkan sebagai berikut.

- Pada baut yang mempunyai lubang dengan ukuran standar, berlebih dan slot pendek yang tidak dipengaruhi oleh arah beban, serta lubang slot panjang yang memiliki arah gaya sejajar dengan arah slot

a) **Tumpu**

- Jika deformasi pada lubang baut digunakan sebagai tinjauan pada beban layan

$$R_n = 2,4 d \times t \times F_u \dots\dots\dots (2.94)$$

- Jika deformasi pada lubang baut tidak digunakan sebagai tinjauan pada beban layan

$$R_n = 3,0 d \times t \times F_u \dots\dots\dots (2.95)$$

b) **Sobek**

- Jika deformasi pada lubang baut digunakan sebagai tinjauan pada beban layan

$$R_n = 1,2 l_c \times t \times F_u \dots\dots\dots (2.96)$$

- Jika deformasi pada lubang baut tidak digunakan sebagai tinjauan pada beban layan

$$R_n = 1,5 l_c \times t \times F_u \dots\dots\dots (2.97)$$

- Pada baut yang mempunyai lubang slot panjang dengan arah gaya tegak lurus dengan arah slot

a) **Tumpu**

$$R_n = 2,0 d \times t \times F_u \dots\dots\dots (2.98)$$

b) **Sobek**

$$R_n = 1,0 l_c \times t \times F_u \dots\dots\dots (2.99)$$

C. Kekuatan Tarik dan Geser Baut

Kekuatan tarik atau geser yang direncanakan (ϕR_n) pada sambungan baut yang dikencangkan harus ditentukan sesuai dengan keadaan batas keruntuhan tarik

dan keruntuhan geser. Berpedoman pada SNI 1729:2020 pasal J4.6, persamaan untuk keadaan batas diatas yakni sebagai berikut:

$$R_n = F_n \times A_b \dots\dots\dots (2.100)$$

Keterangan :

F_n = Tegangan tarik nominal, lihat tabel 2.14 (Mpa)

A_b = Luas baut (mm²)

ϕ = 0,75

D. Kekuatan Geser Balok

Analisa geser blok (*block shear*) dilakukan supaya pada bagian lubang baut tidak mengalami geser yang dapat mengakibatkan kegagalan. *Block shear* sangat dipengaruhi oleh posisi maupun jarak antar baut. Sambungan ini, memiliki jumlah baut yang digunakan relatif banyak apabila dibandingkan dengan mekanisme tumpu yang memiliki jumlah baut relatif sedikit. Melalui penempatan baut secara berkelompok, sehingga ketika terjadi keruntuhan blok dapat berdampak pada satu kelompok. Persamaan untuk kekuatan desain pada saat keadaan batas keruntuhan *block shear* berdasarkan SNI 1729:2020 pasal J4.3 sebagai berikut:

$$R_n = (0,60 F_u \times A_{nv}) + (U_{bs} \times F_u \times A_{nt}) \leq (0,60 F_y \times A_{gv}) + (U_{bs} \times F_u \times A_{nt}) \dots\dots (2.101)$$

Keterangan :

U_{bs} = 1,0 jika tegangan tarik seragam

= 0,5 jika tegangan tarik tidak seragam

A = Luasan neto yang mengalami geser

ϕ = 0,75

E. Perhitungan Jarak antar Baut

Jarak antar baut dengan baut lainnya harus diperhatikan ketika pemasangan. Hal tersebut dilakukan supaya baut mampu memikul beban sesuai dengan kekuatan maupun kapasitas, serta memberikan kemudahan ketika pemasangan. Acuan dalam menentukan jarak antar baut yakni SNI 1729:2020, dimana dijabarkan sebagai berikut :

- Spasi minimum

Mengacu pada SNI 1729:2020 pasal J3.3, jarak as dengan as antar lubang baut tidak boleh kurang dari 2²/3 kali diameter nominal (d). Kemudian, jarak bersih antar lubang baut tidak boleh kurang dari diameter nominal (d). Ketika

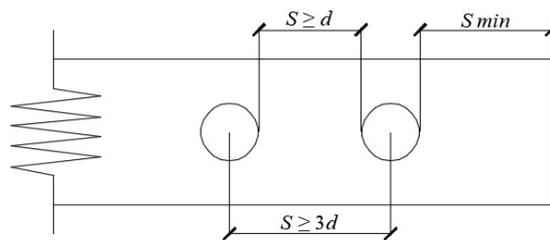
dilapangan, jarak $2^{2/3}$ cenderung dibulatkan mendai 3. Dengan demikian, jarak antar as bisa menggunakan $S \geq 3d$.

- Jarak tepi minimum

Jarak pusat lubang baut ke bagian tepi sambungan tidak boleh kurang dari nilai yang telah ditetapkan pada SNI 1729:2020 tabel J3.3 maupun J3.3M. Hal ini dikarenakan supaya posisi baut tidak terlalu dekat dengan tepi yang dapat mengakibatkan profil baja menjadi sobek.

- Spasi maksimum

Berpedoman pada SNI 1729:2020 pasal J3.5, jarak maksimum dari pusat lubang baut ke bagian tepi yang terdekat pada bagian yang tersambung harus 12 kali ketebalan dari bagian yang disambung, akan tetapi tidak bisa lebih dari 150 mm.

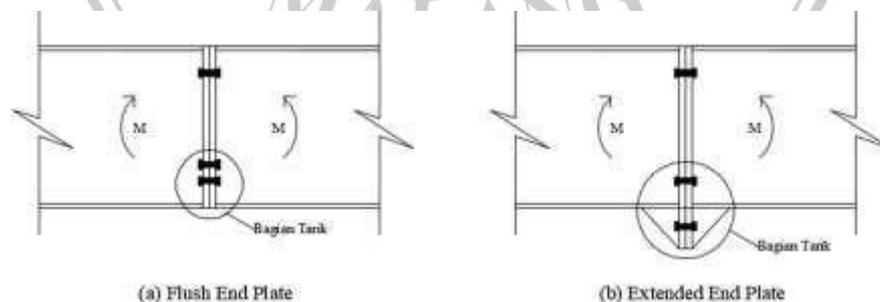


Gambar 2. 17 Jarak Antara Baut

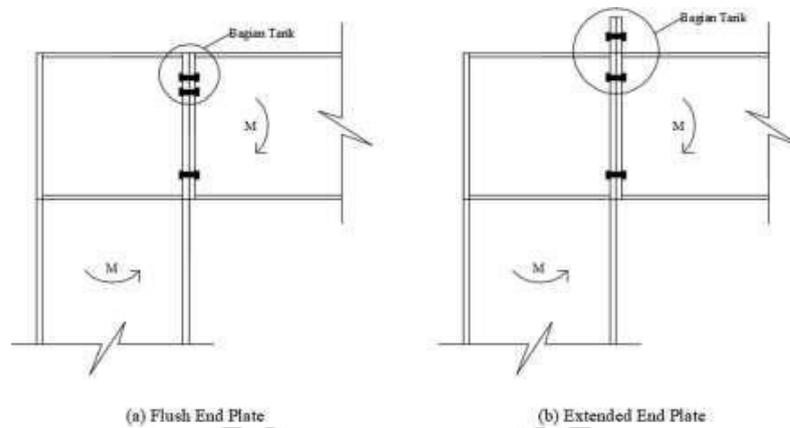
Sumber : (Lesmana, 2021)

2.5.2 Sambungan *End Plate*

Sambungan *end plate* ialah sambungan baut tipe tarik yang memiliki jumlah baut relatif sedikit dan diberi tambahan pelat khusus yang dilas pada bagian ujungnya. Sambungan tersebut bisa dipasang pada balok dengan balok, kolom dengan balok maupun pelat dengan kolom.



Gambar 2. 18 Sambungan End Plate Pada Balok



Gambar 2. 19 Sambungan End Plate pada Portal

A. Kapasitas Pelat Ujung

Kapasitas pada pelat ujung maupun baut tarik sangat berpengaruh terhadap kinerja sambungan *end plate*. Perhitungan kapasitas atau kekuatan maksimal pada pelat ujung dapat menggunakan teori garis leleh (*yield line theory*) dikarenakan telah terbukti keakuratannya.

a) Flush End Plate Polos

Penentuan kekuatan sambungan *end plate* terhadap kondisi batas ketika terjadi leleh pada pelat ujung dapat menggunakan persamaan berikut:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\frac{bf}{2} \left(\frac{h-pt}{pf} + \frac{h-ptz}{u} \right) + 2 (pf + pb + u) \left(\frac{h-pt}{pf} \right) \right] \dots\dots\dots(2.102)$$

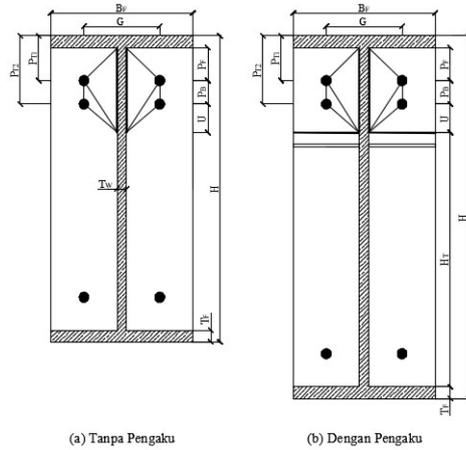
Jika $M_u = \phi M_{pl}$, maka tebal pelat minimum dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{bf g \left(\frac{h-ptz}{h-pt} \right)} \dots\dots\dots(2.103)$$

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\frac{bf}{2} \left(\frac{h-pt}{pf} + \frac{h-ptz}{u} \right) + 2 (pf + pb + u) \left(\frac{h-pt}{pf} \right)} \right] \frac{1}{2} \dots\dots\dots(2.104)$$

Keterangan :

- F_{py} = Tegangan leleh baja pada pelat ujung
- M_{pl} = Kapasitas momen plastis pada pelat ujung
- M_u = Momen batas pada sambungan end plate
- ϕ = Ketuntuhan lentur karena leleh (0,90)



Gambar 2. 20 Pola Garis Leleh Pelat Tipe *Flush End P*

b). *Flush End Plate Menggunakan Pengaku*

Penentuan kekuatan sambungan *end plate* terhadap kondisi batas ketika terjadi leleh pada pelat ujung dapat menggunakan persamaan berikut:

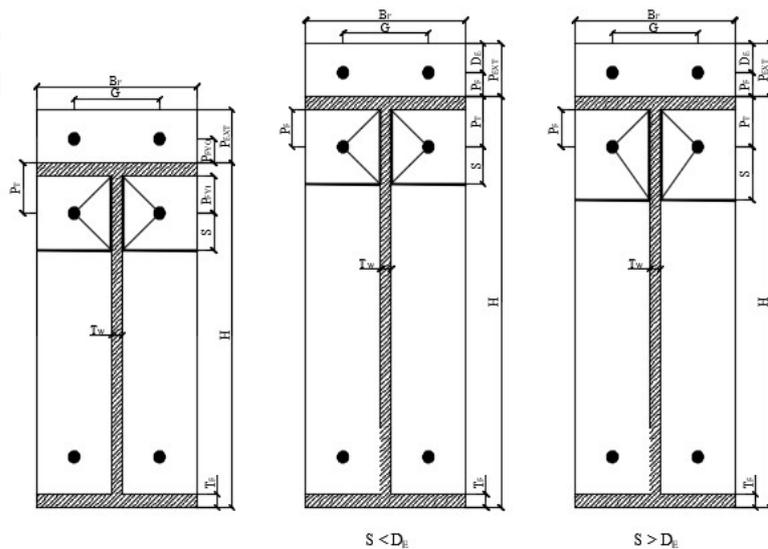
$$AA = (h - pt2) \left[\frac{bf}{2} + \frac{2}{g} (pf + ps) \right] \dots\dots\dots(2.105)$$

$$BB = 1,25 (h - pt2) \left[\frac{bf}{2} \left(\frac{1}{ps} + \frac{1}{2ht} \right) + \frac{g}{10ps} + \frac{2}{g} \left(\frac{Pb}{5} + Ps \right) \right] \dots\dots\dots(2.106)$$

$$Mpl = F_{py} t_p^2 \left[AA + \frac{1}{4} + BB \right] \dots\dots\dots(2.107)$$

Jika $M_u = \phi M_{pl}$, maka tebal pelat dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$t_p \geq \left[\frac{M_u}{\phi F_{py} \left[AA + \frac{1}{4} + BB \right]} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.108)$$



Gambar 2. 21 Pola Keruntuhan Berdasarkan Garis Leleh Pelat Tipe *Extended End Plate*

c). *Extended End Plate Polos*

Penentuan kekuatan sambungan *end plate* terhadap kondisi batas ketika terjadi leleh pada pelat ujung dapat menggunakan persamaan berikut:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\left(\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f \cdot 1} + \frac{1}{s} \right) + (p_f \cdot i + s) \frac{2}{g} \right) + (h - pt) + \frac{b_f}{2} \left(\frac{h}{p_f \cdot 0} + \frac{1}{2} \right) \right] \dots\dots\dots(2.109)$$

Jika $s = \frac{1}{2} (b_f \times g)^{1/2}$ dan $M_u = \phi M_{pl}$, maka tebal pelat perlu dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\left[\left(\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f \cdot 1} + \frac{1}{s} \right) + (p_f \cdot i + s) \frac{2}{g} \right) + (h - pt) + \frac{b_f}{2} \left(\frac{h}{p_f \cdot 0} + \frac{1}{2} \right) \right]} \right] \dots\dots\dots(2.110)$$

d). Extended End Plate dengan Pengaku

- Jika $s < d_e$, maka kekuatan sambungan *end plate* terhadap kondisi batas ketika terjadi leleh pada pelat dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\left(\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f \cdot 1} + \frac{1}{s} \right) + (p_f \cdot i + s) \frac{2}{g} \right) + (h - pt) + (h + pt) \right] \dots\dots\dots(2.111)$$

- Jika $s = \frac{1}{2} (b_f \times g)^{1/2}$ dan $M_u = \phi M_{pl}$, maka tebal pelat perlu dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\left[\left(\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f \cdot 1} + \frac{1}{s} \right) + (p_f \cdot i + s) \frac{2}{g} \right) + (h - pt) + (h + pt) \right]} \right] \dots\dots\dots(2.112)$$

- Jika $s > d_e$, maka kekuatan sambungan *end plate* terhadap kondisi batas ketika terjadi leleh pada pelat dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\left(\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f \cdot 1} + \frac{1}{s} \right) + (p_f \cdot i + s) \frac{2}{g} \right) + (h - pt) + (h + pt) \right] \dots\dots\dots(2.113)$$

Jika $s = \frac{1}{2} (b_f \times g)^{1/2}$ dan $M_u = \phi M_{pl}$, maka tebal pelat perlu dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\left[\left(\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f \cdot 1} + \frac{1}{s} \right) + (p_f \cdot i + s) \frac{2}{g} \right) + (h - pt) + (h + pt) \right]} \right] \dots\dots\dots(2.114)$$

B. Kapasitas Baut

Dari pemaparan sebelumnya, diketahui jika kekuatan pada pelat ujung maupun baut tarik sangat berpengaruh terhadap kinerja sambungan *end plate*. Pada pelat ujung yang mengalami deformasi akan ada efek *prying* (penambahan gaya tarik pada baut). Akan tetapi, apabila deformasi yang terjadi relatif kecil bisa diabaikan. Berikut pemaparan mengenai kekuatan sambungan pada baut tanpa ada efek *prying* :

$$p_t = A_b \times F_{nt} \dots \dots \dots (2.115)$$

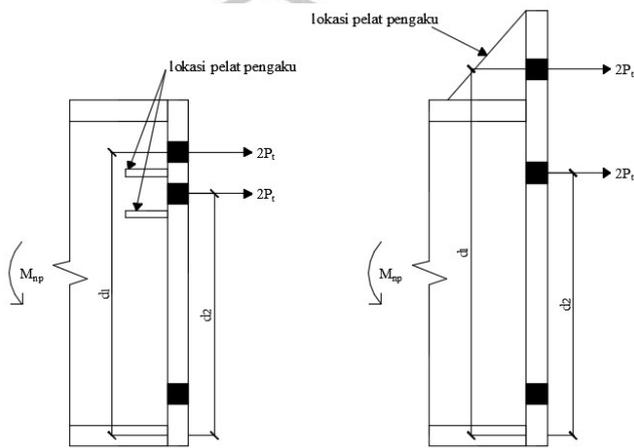
$$M_{np} = 2p_t(d_1 + d_2) \dots \dots \dots (2.116)$$

Keterangan :

M_{np} = Kapasitas sambungan *end plate*

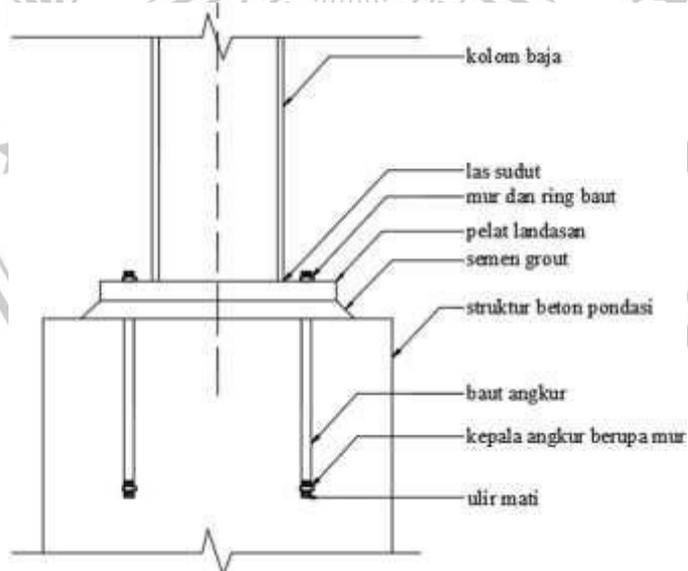
p_t = Nilai kuat tarik baut

ϕ = Ketuntuhan fraktur baut (0,75)



Gambar 2. 22 Momen Kopel Baut Terhadap Sayap Tekan

2.5.3 Sambungan *Base Plate*



Gambar 2. 23 Konfigurasi Base Plate Kolom

Struktur yang menggunakan baja biasanya hanya digunakan pada struktur atas, sedangkan struktur bawah (pondasi) menggunakan beton. Kemudian, untuk

menyambungkan struktur atas baja dengan pondasi yakni dengan sambungan *base plate* (pelat landasan). Prinsip dari *base plate* (pelat landasan) adalah digunakan untuk mentransfer gaya atau momen dari struktur baja (struktur atas) yang berkekuatan relatif besar ke struktur beton (pondasi) tanpa menyebabkan kerusakan karena beban terbagirata ke seluruh pelat landasan. Cara menyambungkan antara pelat landasan dengan kolom baja yakni dengan dilas. Selain itu, juga diperlukan baut angkur yang minimal 2 buah untuk mengantisipasi jika terjadi sebuah momen tidak terduga selama masa konstruksi.

A. Kuat Tumpu Beton

Untuk perencanaan kuat tumpu didasarkan pada kuat tumpu nominal (P_p) dan rasio tahanan ($\phi = 0,65$). Adapun nilai kuat tumpu nominal bergantung pada luasan beton tumpuan yang ada.

- 1) Jika luas beton sama dengan luas pelat landasan, maka persamaan untuk kuat tumpu nominal seperti berikut:

$$P_p = 0,85 f_c' \times A_1 \dots\dots\dots(2.118)$$

atau dalam format tegangan tumpu nominal, maka:

$$f_{p maks} = \phi c \times 0,85 f_c' \dots\dots\dots(2.119)$$

- 2) Jika luas beton tumpuan lebih besar dari luas pelat landasan, maka kuat tumpu beton dapat ditingkatkan sampai dua kalinya. Untuk persamaan kuat tumpu nominal dipaparkan berikut ini :

$$P_p = 0,85 F_e' \times A_1 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 F_e' \times A_1 \dots\dots\dots(2.120)$$

$$f_{p maks} = \phi c \times 0,85 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 f_c' \dots\dots\dots(2.121)$$

Keterangan :

f_c' = Kuat tekan beton (Mpa)

A_1 = Luas beton yang dibebani (mm^2)

A_2 = Luas bawah piramida terpancung yang luas atas adalah A_1 ,

dimana sisi miringnya memiliki perbandingan 2:1 untuk rasio horizontal dan vertikal (mm^2)

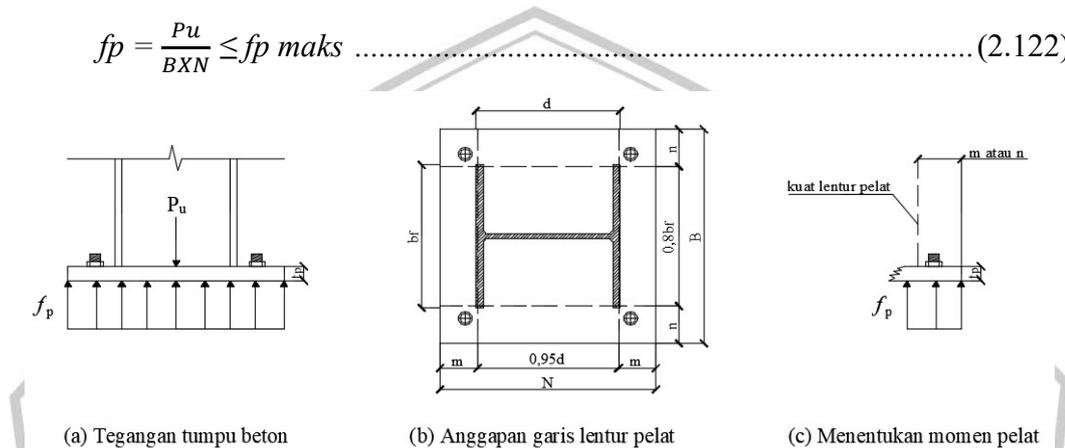
Jika luas beton tumpuan lebih besar dari luas *base plate*, nantinya bagian beton tumpuan tersebut bisa berfungsi sebagai struktur pengekang untuk bagian

beton yang terbebani. Hal itu menjadi salah satu cara untuk meningkatkan kembali kuat tumpunya.

B. Tekan Konsentris

Jika *base plate* bertumpu pada permukaan beton (pondasi) berarti dimensi pelat landasan ($B \times N$) harus diperhitungkan supaya beton yang berada dibawahnya tidak mengalami kerusakan. Adapun ketentuan dalam menghitungnya sebagai berikut:

$$f_p = \frac{P_u}{B \times N} \leq f_p \text{ maks} \dots\dots\dots(2.122)$$



Gambar 2. 24 Base Plate Terhadap Beban Tekan Konsentris

Kuat perlu pada pelat landasan dapat ditentukan sebagai berikut:

$$M_p = \frac{1}{2} f_p \times l^2 \dots\dots\dots(2.123)$$

l sendiri merupakan nilai terbesar dari m , n , dan $\lambda n'$.

$$m = \frac{N - 0,95d}{2} \dots\dots\dots(2.123)$$

$$n = \frac{B - 0,8bf}{2} \dots\dots\dots(2.124)$$

$$\lambda n' = \frac{1}{4} \lambda \sqrt{d \times bf} \dots\dots\dots(2.125)$$

$$\lambda = \frac{2\sqrt{x}}{1 + \sqrt{1-x}} \leq 1 \dots\dots\dots(2.126)$$

$$X = \left[\frac{4d \times bf}{(d+bf)^2} \right] \frac{P_u}{\phi_c P_p} \dots\dots\dots(2.127)$$

Nilai λ bisa diambil = 1. Pada kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan bisa ditetapkan menggunakan persamaan berikut:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_p l}{\phi F_y}} = 1 \sqrt{\frac{2f_p l}{\phi F_y}} = 1 \sqrt{\frac{2P}{\phi F_y \times B \times N}} \dots\dots\dots(2.129)$$

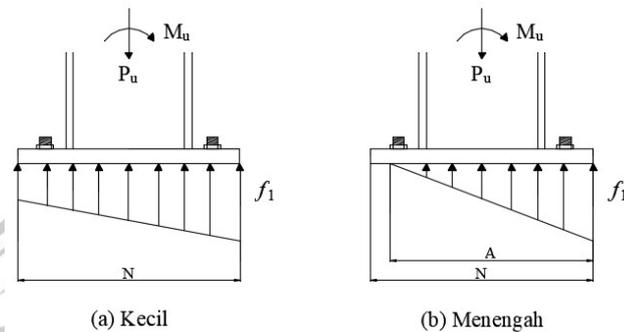
Keterangan:

ϕ = faktor ketahanan (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

1. Momen kecil tanpa angkur

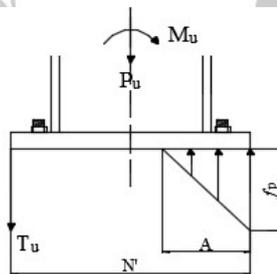


Gambar 2. 25 Distribusi Tegangan Segitiga Akibat Eksentrisitas Kecil

Pendekatan tegangan tumpu beton pada kondisi elastis (segitiga) dipilih disebabkan dapat memberi gambaran yang cukup rasional mengenai efek eksentrisitas (e) akibat gaya tekan P_u terhadap *base plate*. Nilai e dikatakan sedang apabila tidak memerlukan baut angkur untuk keseimbangannya. Dengan demikian, nilai eksentrisitas (e) terbagi menjadi dua keadaan seperti berikut:

- a) Kecil, Jika $e = \frac{M_u}{P_u} \leq \frac{N}{6}$
- b) Menengah, Jika $e = \frac{N}{6} \leq e \leq \frac{N}{2}$

2. Momen Besar dengan Angkur



Gambar 2. 26 Distribusi Tegangan Segitiga Akibat Eksentrisitas Besar

Apabila eksentrisitas gaya P_u besar mengakibatkan *base plate* bisa terguling. Antisipasi yang harus dilakukan ialah dipasang baut angkur untuk menahan gaya tarik sebesar T_u akibat dari momen guling. Ukuran pelat landasan dipilih sedemikian maka tegangan tekan beton (f_p) tidak melebihi tegangan tumpu

nominal beton. Pencarian nilai T_u dan A menggunakan persamaan keseimbangan vertikal dan momen berikut ini :

$$T_u + P_u = \frac{1}{2} f_p \times A \times B \dots \dots \dots (2.130)$$

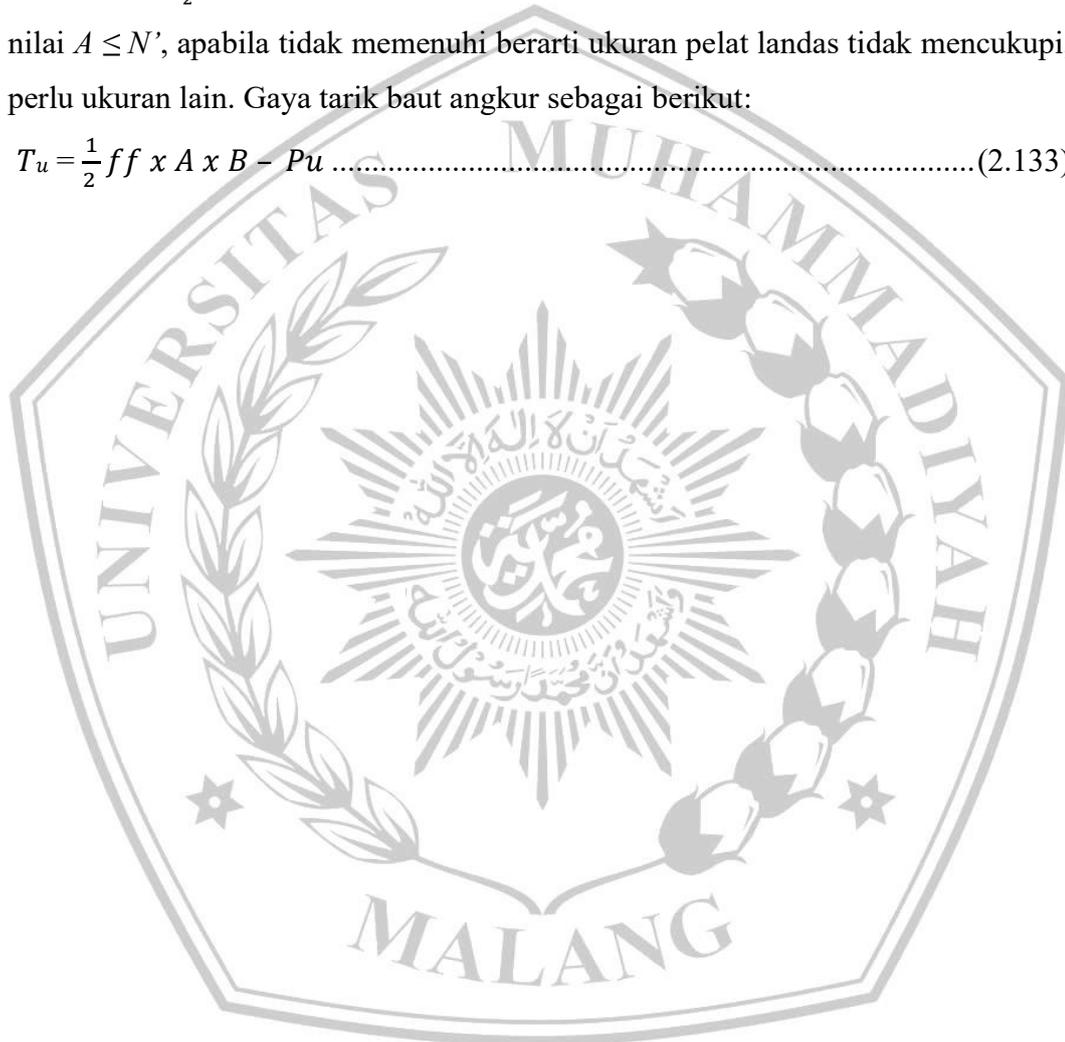
$$P_u = \left(\frac{N}{2} - x \right) + M_u = \frac{1}{2} f_p \times A \times B \left(N - x - \frac{A}{3} \right) \dots \dots \dots (2.131)$$

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

$$A = \frac{f' \pm \sqrt{f'^2 - 2x f_p \times B (P_u A' + M_u)}}{\frac{1}{2} f_p \times B} \dots \dots \dots (2.132)$$

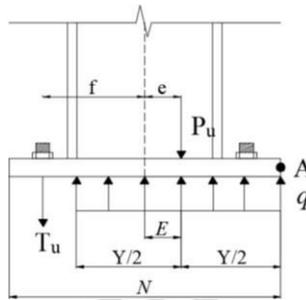
nilai $A \leq N'$, apabila tidak memenuhi berarti ukuran pelat landas tidak mencukupi, perlu ukuran lain. Gaya tarik baut angkur sebagai berikut:

$$T_u = \frac{1}{2} f_f \times A \times B - P_u \dots \dots \dots (2.133)$$



D. Tegangan Beton Persegi

1). Momen kecil tanpa angkur



Gambar 2. 27 Distribusi Tegangan Persegi Akibat Eksentrisitas Kecil

Perencanaan *base plate* menggunakan beban eksentris dapat didasarkan pada asumsi distribusi tegangan beton yang berbentuk segitiga ataupun kondisi tegangan elastis. Apabila beban bertambah hingga kondisi batas, perilaku elastis terlewati serta masuk kondisi inelastis, maka beton pada kondisi batas (*ultimate*).

$$q_{maks} = f_p \text{ maks} \times B \dots\dots\dots (2.134)$$

$$y_{min} = \frac{P_u}{q_{maks}} \dots\dots\dots (2.135)$$

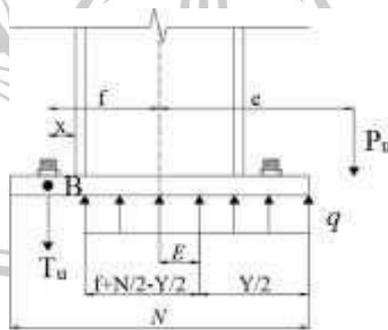
Apabila e jarak resultan tumpu beton terhadap pusat berat kolom:

$$e_{maks} = \frac{N}{2} - \frac{y_{min}}{2} = \frac{N}{2} - \frac{P_u}{2q_{maks}} \dots\dots\dots (2.136)$$

$$e_{kritis} = e_{maks} = \frac{N}{2} - \frac{P_u}{2q_{maks}} \dots\dots\dots (2.137)$$

Eksentrisitas beban $\leq e_{kritis}$ artinya baut angkur tidak diperlukan.

2). Momen besar dengan angkur



Gambar 2. 28 Distribusi Tegangan Persegi Akibat Eksentrisitas Besar

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

Pencarian nilai T_u dan Y menggunakan persamaan keseimbangan gaya vertikal sebagai berikut :

$$T_u + P_u = qY \dots\dots\dots (2.138)$$

Serta keseimbangan momen terhadap titik B seperti berikut:

$$q_{maks} = Y \frac{N}{2} - \frac{Y}{2} + f - Pu(e + f) = 0 \dots\dots\dots(2.139)$$

Sesudah pengaturan diperoleh persamaan kuadrat sebagai berikut:

$$Y^2 - 2\left(\frac{N}{2} + f\right) Y + \frac{2Pu(e+f)}{q_{maks}} = 0 \dots\dots\dots(2.140)$$

Kemudian, penyelesaian untuk Y yakni :

$$Y = \left(\frac{N}{2} + f\right) \pm \sqrt{\left(\frac{N}{2} + f\right)^2 - \frac{2P(e+f)}{q_{maks}}} \dots\dots\dots(2.141)$$

Dalam sebuah kombinasi gaya, momen dan ukuran *base plate* tidak didapat penyelesaian, maka dimensi *base plate* harus diperbesar. Supaya persamaan dapat diselesaikan, maka :

$$\left(\frac{N}{2} + f\right)^2 \geq \frac{2pu(e+f)}{q_{maks}} = 0 \dots\dots\dots(2.142)$$

Gaya pada angkur ialah :

$$Tu = qY - Pu \dots\dots\dots(2.143)$$

Untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan sebagai berikut :

$$tp \geq \sqrt{\frac{4Mpl}{\phi Fy}} \quad (2.144)$$

Saat kondisi desak, momen terjadi karena tegangan reaksi beton pada kantilever m dari tumpuannya.

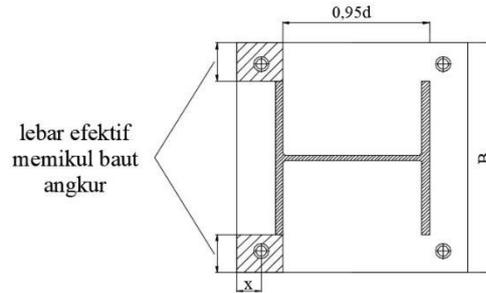
$$tp \geq \sqrt{\frac{4Mpl}{\phi Fy}} = \sqrt{\frac{4\left(\frac{1}{2}fp \times m^2\right)}{0,90 Fy}} = 1,5 m \sqrt{\frac{fp}{Fy}} \dots\dots\dots(2.145)$$

Apabila $Y < m$, maka :

$$tp \geq \sqrt{\frac{4Mpl}{\phi Fy}} = \sqrt{\frac{4\left(\frac{1}{2}fp \times m - \frac{Y}{2}\right)}{0,90 Fy}} = 2,11 m \sqrt{\frac{fp \times Y \left(m - \frac{Y}{2}\right)}{Fy}} \dots\dots\dots(2.146)$$

$$fu = \frac{Pu}{BF} \dots\dots\dots(2.147)$$

Pada bagian sisi tarik, momen terjadi karena reaksi baut angkur yang bekerja sebagaimana beban terpusat di pelat. Oleh karena itu, jumlah baut juga berpengaruh, khususnya terhadap lebar efektif pelat.



Gambar 2. 29 Lebar Efektif Pelat Pemikul Baut Angkur

Tebal pelat landasan minimum untuk memikul baut ankur yakni:

$$tp \geq \sqrt{\frac{4Mpl}{\phi Fy}} = \sqrt{\frac{4 \left(\frac{Tu \cdot x \cdot a}{nb \cdot za} \right)}{0,90 Fy}} = 1,5 m \sqrt{\frac{Tu}{nb \cdot x \cdot Fy}} \dots\dots\dots(2.148)$$

Keterangan :

n_b = jumlah baut ankur yang dipasang

2.5.4 Sambungan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus

Pada saat merencanakan sebuah struktur baja dibutuhkan sambungan yang dapat menahan momen. Ada beberapa tipe sambungan dalam perencanaan menggunakan sistem rangka pemikul khusus. Adapun pemaparan mengenai tipe sambungan tersebut sebagai berikut.

A. Bolted Unstiffened end Plate (BUEP) Connection

Bolted Unstiffened end Plate (BUEP) merupakan sebuah sambungan yang harus didesain sedemikian rupa supaya ketika terjadi leleh pada saat kombinasi balok lentur dengan panel zone ataupun leleh pada balok lentur saja. Elemen pelat ujung, baut maupun las harus didesain sedemikian rupa supaya elemen-elemen tersebut tidak leleh. Untuk desain harus menggunakan langkah-langkah berikut:

$$Mf < 2Tub (d0 + d1) \dots\dots\dots(2.149)$$

$$Tub = Ab \times Fnt \dots\dots\dots(2.150)$$

Keterangan :

M_f = Momen rencana (kNm)

Tub = Gaya tarik yang terjadi (N)

d_0 = Jarak baut paling atas dengan sayap profil bagian bawah (mm)

d_1 = Jarak baut sayap bagian atas dengan sayap profil bawah (mm)

Ab = Luas baut (mm²)

Fnt = Kuat tarik nominal (MPa)

Dalam mengantisipasi kegagalan geser dibutuhkan ukuran baut yang sesuai dengan memastikan nilai A_b harus memenuhi persamaan berikut :

$$A_b \geq \frac{\frac{2M_f}{L-dc} + V_g}{3F_v} \dots\dots\dots(2.151)$$

Keterangan :

dc = Lebar badan profil (mm)

V_g = Gaya geser nominal (kN)

F_v = Kuat geser nominal (Mpa)

Penentuan tebal pelat ujung minimum berdasarkan lentur melalui persamaan :

$$S = \sqrt{bp \times g} \dots\dots\dots(2.152)$$

$$t_p = \sqrt{\frac{M_f}{0,8F_{yp} \left\{ (db - p_i) \left[\frac{bp}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{s} \right) + (p_f + s) \frac{2}{g} \right] + \frac{bp}{2} \left(\frac{db}{p_f} + \frac{1}{2} \right) \right\}}} \dots\dots\dots(2.153)$$

Keterangan :

bp = Lebar pelat sambung (mm)

F_{yp} = Mutu pelat yang digunakan (Mpa)

db = Tinggi badan profil (mm)

p_i = Jarak bagain sayap atas profil dengan baut di bawahnya (mm)

p_f = Jarak bagain sayap atas profil dengan baut di atasnya (mm)

Penentuan tebal pelat ujung minimum berdasarkan geser melalui persamaan :

$$t_p = \frac{M_f}{1,1 F_{yp} \times bp (db - bf)} \dots\dots\dots(2.154)$$

Menentukan kebutuhan pengaku pada panel zone. Pelat Pengaku tidak dibutuhkan jika telah memenuhi syarat-syarat berikut :

$$t_{cf} \geq 0,4 \sqrt{1,8 bb_f \times t_{bf} \times \frac{R_{yb} \times F_{yb}}{R_{yc} \times F_{yc}}} \dots\dots\dots(2.155)$$

Dan

$$t_{cf} \geq \frac{bb_f}{6} \dots\dots\dots(2.156)$$

Keterangan :

bb_f = Ukuran sayap profil (mm)

t_{bf} = Ukuran tebal profil (mm)

F_{yb} = Mutu pelat yang digunakan (Mpa)

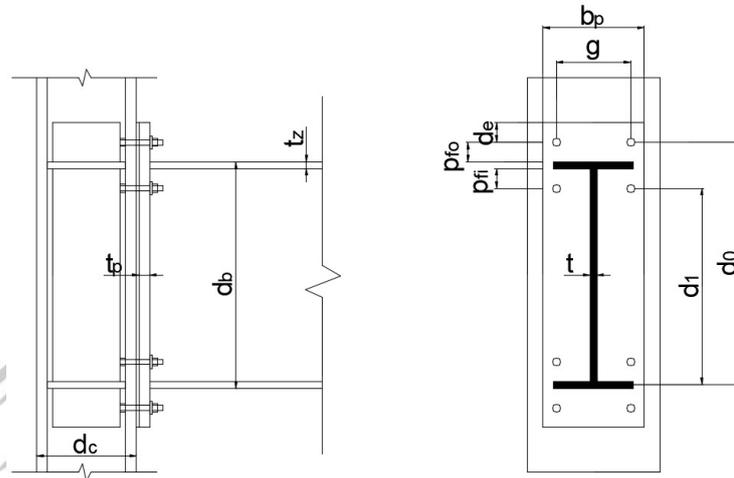
Akan tetapi, apabila persamaan diatas masih tidak terpenuhi. Maka untuk tebal pelat pengaku bisa dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$t_2 \geq \frac{d_2 + W_2}{90} \dots\dots\dots(2.157)$$

Keterangan :

d_2 = Tinggi badan profil (mm)

W_2 = Lebar badan profil (mm)



Gambar 2. 30 Bolted Unstiffened End Plate Connection

B. Stiffned End Plate Connection

Sambungan *Stiffned End Plate Connection* mesti dirancang sedemikian rupa supaya saat terjadi leleh pada kombinasi balok lentur dengan panel zone ataupun hanya leleh pada balok lentur. Rancangan harus dilakukan berdasarkan langkah-langkah berikut ini:

$$M_f < 3,4 Tub (d_0 + d_1) \dots\dots\dots(2.158)$$

$$Tub = A_b \times F_{nt} \dots\dots\dots(2.159)$$

Untuk nilai Tub harus memenuhi :

$$Tub \geq \frac{0,00002305 p_f 0,591 (F_{fu})^{2,583}}{t_p 0,895 \times dbt 1,909 \times t_s 0,327 \times b_p 0,965} + T_b \dots\dots\dots(2.160)$$

Keterangan :

dbt = Tinggi profil balok (mm)

t_s = Tebal profil bagian bawah (mm)

T_b = Pretensi baut minimum

Dalam mengantisipasi kegagalan geser dibutuhkan ukuran baut yang sesuai dengan memastikan nilai A_b harus memenuhi :

$$A_b \geq \frac{2M_f}{L - d_c} + V_g \dots\dots\dots(2.161)$$

Penentuan Tebal pelat ujung minimum berdasarkan lentur melalui persamaan :

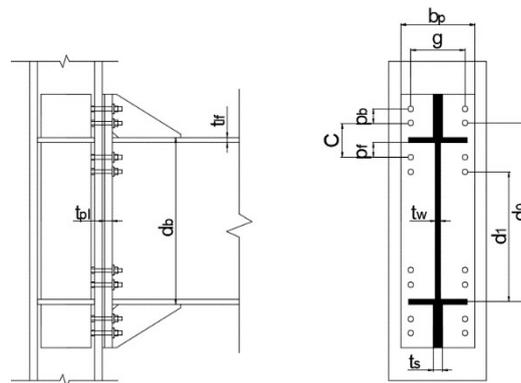
$$t_p = \frac{0,00609 p_f 0,9 X g 0,6 X F_f u 0,9}{d_b t 0,9 X t_s 0,1 X b_p 0,7} \dots\dots\dots(2.162)$$

Atau

$$t_p = \frac{0,00413 p_f 0,25 X g 0,15 X F_f u}{d_b t 0,9 X t_s ,15 X b ,3} \dots\dots\dots(2.163)$$

Menentukan kebutuhan pengaku pada panel zone. Pelat Pengaku tidak dibutuhkan jika telah memenuhi syarat dibawah ini :

$$T_{cf} \geq \sqrt{\frac{a_m x F_f u x C 3}{0,9 F_{yc} (3,5 p_b + c)}} \dots\dots\dots(2.164)$$



Gambar 2. 31 Stiffened End Plate Connection

C. Bolted Flange Plate (BEF) Connection

Ketebalan panel zone disarankan tidak melebihi kekuatan dari panel zone untuk sambungan *Bolted Flange Plate* (BFP). Apabila ketebalan zona panel lebih dari 1,5 kali yang diperlukan, maka disarankan memakai kombinasi ukuran balok dengan kolom yang berbeda. Dalam menentukan ketebalan minimum flens pelat yang dibutuhkan menggunakan persamaan berikut :

$$T_{pl} = \frac{d_b - \sqrt{d_b^2 - \frac{4 M_y f}{F_y x b_p}}}{2} \dots\dots\dots(2.165)$$

Untuk mengantisipasi kegagalan penampang neto maupun kegagalan perpanjangan lubang baut, maka sebuah baut harus memenuhi persamaan berikut :

$$1,2 M_y \leq M_{fail} \dots\dots\dots(2.166)$$

Keterangan :

M_y = Momen di ujung kolom saat terjadi leleh pada sayap balok (Nmm)

M_{fail} = Momen di ujung kolom pada saat terjadi kegagalan (N-mm)

Menentukan M_{fail} untuk kegagalan geser baut :

$$M_{fail bolt} = 2N \times A_b \times F_v bolt \times d_b \times L_{TF1} \dots\dots\dots(2.167)$$

$$L_{TF1} = \frac{L-d_c}{L-d_c-(2S_1+S_3)} \dots\dots\dots(2.168)$$

Keterangan :

$F_v \text{ bolt}$ = Kekuatan geser nominal baut (N)

L_{TF1} = Rasio panjang untuk meneruskan momen dari pusat baut ke ujung kolom

S_1 = Jarak profil kolom ke baut pertama (mm)

Menentukan M_{fail} untuk patah penampang netto pelat sayap :

$$M_{failyf} = 0,85 F_{u-pl} \times [b_p - 2 (d_{bt \text{ bolt}} + 0,062)] \times t_{pl} \times (d_b + t_{pl}) \times L_{TF2} \dots\dots\dots(2.169)$$

$$L_{TF2} = \frac{L-d_c}{L-d_c-2S_1} \dots\dots\dots(2.170)$$

Keterangan :

d_{bt} = Diameter baut (mm)

L_{TF2} = Rasio untuk meneruskan momen pada lubang baut yang paling dekat dengan ujung kolom

Menentukan M_{fail} muka kolom untuk patah penampang netto dari sayap balok:

$$M_{fail} = F_{u-b} \times [Z_b - 2 \times (d_{bt \text{ hole}} + 0,062) \times t_{fb} \times (d_b - t_{fb})] \times L_{TF3} \dots\dots\dots(2.171)$$

$$L_{TF3} = \frac{L-d_c}{L-d_c-2(S_1+S_3)} \dots\dots\dots(2.172)$$

Keterangan :

$d_{bt \text{ hole}}$ = Diameter lubang baut (mm)

L_{TF3} = Rasio untuk meneruskan momen dari lubang baut terjau dari ujungkolom ke ujung kolom

Menentukan M_{fail} pada muka kolom untuk pemanjangan lubang baut :

$$M_{fail} = T_n \times \left(d_b + \frac{t_{PL-t} + t_{PL-b}}{2} \right) \times L_{TF1} \dots\dots\dots(2.173)$$

Kemudian, nilai T_n diambil yang terkecil dari kedua persamaan berikut :

$$T_n = 2,4 F_{u-b} \times (S_3 + S_1 - c) \times t_{fb} \dots\dots\dots(2.174)$$

$$T_n = 2,4 F_{u-pl} \times (S_3 + S_4) \times t_{pl} \dots\dots\dots(2.175)$$

Keterangan :

t_{PL-t} = Tebal pelat bagian atas (mm)

t_{PL-b} = Tebal pelat bagian bawah (mm)

Pengecekan geser blok bertujuan untuk memastikan jika momen pada ujung kolom sudah sesuai dengan syarat sambungan pada langkah 6. Kemudian, pada rancangan pelat tunggal, sambungan *shear- tab* yang dibaut cukup menahan geser yang diberikan :

$$V_{web} = \frac{2M_f}{L-d_c} + V_g \dots\dots\dots(2.176)$$

